



Intensification de l'agriculture biologique : conséquences sur la régulation des phytophages en vergers de pommiers

Gaëlle Marliac

► To cite this version:

Gaëlle Marliac. Intensification de l'agriculture biologique : conséquences sur la régulation des phytophages en vergers de pommiers. Biologie végétale. Université d'Avignon, 2014. Français. NNT : 2014AVIG0661 . tel-01163396

HAL Id: tel-01163396

<https://theses.hal.science/tel-01163396>

Submitted on 12 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Thèse de doctorat

Présentée par

Gaëlle Marliac

Ecole doctorale : Sciences et Agrosiences (ED 536)

Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

Intensification de l'agriculture biologique : conséquences sur la régulation des phytophages en vergers de pommiers

Soutenue le 20 novembre 2014

Jury :

M. Didier Andrivon, Directeur de Recherche, INRA

M. Jean Philippe Deguine, Directeur de recherche, CIRAD

Mme Amélie Lefèvre, Ingénieur, INRA

M. François Mesleard, Directeur de recherche, UAPV

Mme Françoise Lescourret, Directrice de Recherche, INRA

M. Yvan Capowiez, Chargé de recherche, INRA

Mlle Servane Penvern, Chargée de mission AB, INRA

Rapporteur

Rapporteur

Examinateur

Examinateur

Directrice de thèse

Directeur de thèse

Membre invité

Remerciements

C'est sur ces quelques mots que je termine l'écriture de ce manuscrit témoin d'une aventure de trois ans.

Je tiens à remercier Françoise Lescourret pour avoir accepté de diriger cette thèse, de m'avoir accompagnée dans mes premiers pas dans le monde de la recherche en me consacrant toujours de son temps si précieux.

Je remercie très sincèrement Yvan Capowiez pour m'avoir encadrée au quotidien dans cette aventure. Ton dynamisme, ta rigueur et tes compétences auront été de précieux atouts (notamment dans les moments de doute inhérents à une thèse). Nos caractères auront su s'accorder pour mener à bien ce « super » sujet de thèse.

Merci à Servane Penvern d'être à l'origine de ce sujet passionnant et d'avoir participé à l'encadrement de cette thèse. On aura aussi partagé notre première expérience avec les médias : expérience déroutante mais enrichissante.

Ce travail a été soutenu par l'ANR DynRurABio, le metaprogramme Smach (Sustainable Management of Crop Health) et le programme PURE

Ce travail n'aurait pas été possible sans la participation des producteurs AB de notre zone d'étude. Merci de m'avoir accueillie, parlé de votre métier et accepté que je travaille sur vos parcelles. Merci aussi aux techniciens pour le temps qu'ils m'ont accordé lors de la construction de notre réseau AB.

Je n'aurais pu réaliser les relevés sur le terrain seule alors merci aux différents stagiaires (Marianne, Arthur, Alexandre, Romain, Amaya) qui ont participé à ce travail, vous aurez vécu avec moi mes premiers pas dans la recherche et dans l'encadrement. Et merci à Cécile Thomas et Juliette Goussopoulos pour leur aide sur le terrain.

Un grand merci à Sylvaine Simon pour ses conseils précieux et toujours très pertinents. Merci aussi à Christophe Mazzia et Magali Rault.

Je souhaite saluer Mickaël Hedde et Jodie Thénard pour leur précieuse aide lors de l'identification des carabes et le temps qu'ils ont consacré pour me former à cette identification. Merci Mickaël de m'avoir ouvert les portes du projet BETSI et ainsi permis d'appréhender la notion de traits fonctionnels.

Je tiens à remercier les membres de mon comité de thèse pour leur investissement et leurs conseils toujours très intéressants : Claudia Daniel, Jean-Marc Barbier, Manuel Plantegenest, Philippe Tixier.

Je tiens aussi à remercier Didier Andrivon et Jean-Philippe Deguine qui ont accepté de juger ce travail en tant que rapporteurs. Je remercie également Amélie Lefèvre et François Mesléard qui ont accepté de faire partie du jury de thèse.

Merci à l'équipe PSH de m'avoir accueillie pendant ces trois années : Jean-François Toubon (pour ces précieuses connaissances des producteurs), Pierre Franck et Jérôme Olivarès (de m'avoir permis de réaliser des analyses de contenus stomacaux), Sandrine Maugin (pour m'avoir assuré l'approvisionnement en œufs sentinelles) mais aussi Virginie R, Patricia, Constance, Myriam, Emilie, Mariline, Refka, Virginie B, Emmanuelle, Odile... pour les bons moments passés en votre compagnie.

Durant cette thèse, j'ai eu la chance de pouvoir faire à séjour de trois mois à l'étranger, merci à Agreenium d'avoir créé l'EIR-A. Je tiens à remercier à Steeve Wratten de m'avoir accueillie dans son équipe et m'avoir permis de découvrir un autre système de recherche. Merci à Yann-David Varennes de m'avoir communiqué sa passion pour ses parasitoïdes (mais aussi pour le partage de nos déboires de thésards), travailler avec toi (et Coline) a été une belle expérience.

Ce séjour en Nouvelle-Zélande aura été une très belle étape durant ces trois ans aussi grâce à l'équipe d'étudiants cosmopolites de Lincoln University : merci à Marionna, Javi, Maronna, Marcel, Ursulla, Frederico, Maria, Patricio, Coline, Nina, Yvan, Cian.

Avignon n'a pas été seulement été synonyme de thèse, un grand merci à Virginie et tes petits loups (Camille et Alix), Simon, Cécille, Fred, Rebecca, Constance, Patricia, Carole, Stéphanie pour les bons moments passés. Vous avez vécu ma thèse au quotidien et supporté mes moments de stress, ce n'a pas du être simple tous les jours pour vous !

Parce que le meilleur conseil que l'on m'ai donné en commençant cette thèse, c'était de continuer à voir mes amies « hors thèse » (merci Mickaël pour ce précieux conseil), un grand merci à vous les filles Manue, Adeline, Lucie, Floriane, Julie, Claire, Miren, Cindy! Vous avez été ma « soupape de sécurité », vous avez vécu mes moments de joie et de doute.

Merci à mes parents et mon frère Florent, vous m'avez toujours encouragée et soutenue, votre présence (même à des kilomètres d'Avignon) a été indispensable pour finir cette thèse.

Resumé

L'agriculture biologique (AB) est classiquement comparée à l'agriculture conventionnelle. Elle est alors souvent considérée comme plus favorable à la biodiversité que l'agriculture conventionnelle, même si certaines études montrent un effet négatif ou une absence d'effet de l'AB par rapport à l'agriculture conventionnelle pour certains taxons (Bengtsson et al. 2005; Garratt et al. 2011; Hole et al. 2005; Winqvist et al. 2011). Cela peut s'expliquer par le fait que l'AB ne se différencie pas seulement par le remplacement des produits phytosanitaires de synthèse par des produits autorisés en agriculture biologique mais aussi par la mise en oeuvre d'autres pratiques comme l'implantation d'un couvert végétal. L'AB dispose d'une large gamme de pratiques visant à limiter les ravageurs et/ou à favoriser leur contrôle biologique via leurs ennemis naturels.

Les objectifs de cette thèse sont :

- (i) d'établir un état des lieux de la diversité des stratégies de protection mises en place par les producteurs en AB pour lutter contre les deux ravageurs majeurs en vergers de pommiers, le carpocapse des pommes et le puceron cendré et d'identifier les pratiques permettant une diminution de l'usage des pesticides ;
- (ii) d'évaluer si ces pratiques ont un effet sur les communautés des prédateurs généralistes présentes dans la couronne ;
- (iii) d'estimer le rôle fonctionnel des prédateurs généralistes en mesurant la fonction de prédation en vergers de pommiers.

En prenant comme cas d'étude les vergers de pommiers du Sud-Est de la France, nous avons dans un premier temps réalisé un état des lieux de la diversité des pratiques de protection mises en place en agriculture biologique à l'échelle de l'exploitation. Suite à une série d'enquêtes chez les producteurs, quatre stratégies de protection avec différentes combinaisons de pratiques ont été définies. Un suivi des ennemis naturels dans des parcelles-types a permis de mettre en évidence des communautés d'ennemis naturels différentes selon les stratégies de protection.

Dans un deuxième temps, nous avons étudié le lien entre la diversité des prédateurs généralistes et la régulation biologique (ici, la prédation des œufs de carpocapse). Cette étude a été réalisée sur 20 parcelles en AB caractérisées par différents usages de pesticides

biologiques. Cette étude a permis de mettre en évidence des taux de prédation différents et une variabilité des communautés d'ennemis naturels selon les parcelles et d'identifier les ennemis naturels corrélés à la prédation des oeufs.

Dans un troisième temps, notre étude s'est portée sur une modification particulière de l'habitat, l'enherbement de l'inter-rang, une pratique mise en place par les producteurs et facile à gérer, notamment via l'intensité de fauche. Nous avons voulu déterminer, à l'aide d'une approche expérimentale en verger, si cette modification était un levier efficace pour augmenter l'abondance et la diversité des ennemis naturels et donc la régulation, soit au niveau de la canopée (prédation des œufs de carpocapse) soit au niveau du sol (prédation des larves de carpocapse). La communauté d'ennemis naturels dans l'arbre est apparue peu impactée par la hauteur d'enherbement ; seul *Forficula pubescens* est plus abondant lorsque le couvert végétal est haut (1m20). La prédation des œufs est quant à elle plus forte, aux mois de juillet et août, lorsque le couvert végétal est ras (5cm). La prédation des larves n'est pas différente selon la hauteur du couvert végétal.

Cette thèse a permis de mettre en évidence une diversité des stratégies de protection en vergers de pommiers en AB. Elle a montré une variabilité des communautés d'ennemis naturels au sein de l'AB. Elle illustre la complexité du lien entre pratiques agricoles, ennemis naturels et prédation des bioagresseurs.

Mots clés : Agriculture biologique, diversité des pratiques de protection, enherbement, ennemis naturels, prédation.

Abstract

Organic agriculture is assumed to achieve more sustainable practices by reducing the negative environmental impacts of intensive agriculture, such as biodiversity decline. While positive links between organic agriculture and natural enemy abundance and/or diversity have often been reported, this was not always the case (little or no difference between the systems, or sometimes in favor of the conventional system) and it appears to be variable depending on the species considered (Bengtsson et al. 2005; Garratt et al. 2011; Hole et al. 2005; Winqvist et al. 2011). The benefits to biodiversity from organic agriculture are likely to stem primarily from prohibition of synthetic chemicals but also from the adoption of various other management practices (cultural practices, ground cover management, presence of hedgerows). Indeed, organic management strategies are thus defined by a combination of different practices (Zehnder et al. 2007) that can have a different effect on the natural enemy community (Hole et al. 2005; Simon et al. 2007).

The objectifs of this thesis are :

- (i) characterized the diversity of crop protection strategies on organic agriculture and identified the practices led to reduced pesticide usage;
- (ii) investigated whether these practices have an impact on the natural enemy abundance and diversity in the canopy;
- (iii) assess the natural enemy predation activity in apple orchard.

First, we identified four crop protection strategies, which were characterized by a specific combination of different types of practices. We showed that natural enemy communities and their efficacy were influenced by these strategies.

Second, we examined the relationships between the abundance of generalist predators and the level of pest control under natural conditions (predation of codling moth eggs). We used a set of organically farmed commercial orchards with various protection strategies and showed that the predation rate and the natural enemy communities were different but variable among the organic apple orchard. We identified the natural enemy correlated with the predation rate.

Finally, we managed the ground cover and compared the effect of three heights, tall (no cutting), medium (mean height of 20 cm) and short (mean height of 5 cm), of a spontaneous grass cover in an experimental orchard on natural enemy abundance and predation rates on the canopy (predation of codling moth egg) and on the ground (predation of codling moth larvae). The natural enemy community on the canopy was little impact by the height of the ground cover ; only *Forficula pubescens* was more abundant in the no cutting than in the short ground cover. The egg predation was higher in the short ground cover than in the two other modalities. The larvae predation was not impacted by the ground cover height.

We characterized a diversity of crop protection strategy on organic agriculture in apple orchard. We identified a variability of the natural enemy communities on organic apple orchard. This thesis illustrated the complexity of the relationship between agricultural practices, natural enemies and predation of pests.

Key words : Organic agriculture, Crop protection management, Habitat management, natural enemies, predation

Publications

Articles soumis à des revues sans comité de lecture

- Marliac G, Simon S, Fleury A, Alaphilippe A, Dib H, Capowiez Y; **Contrasting effects of codling moth exclusion netting on the natural control of the rosy apple aphid** ; 8th International Conference on Integrated Fruit Production at Kusadasi (Turkey), 07–12 October, 2012, 81-85.

Articles soumis à des revues à comité de lecture

- Marliac G, Penvern S, Barbier JM, Lescourret F, Capowiez Y; **The diversity of crop protection strategies in organic farming and their impact on natural enemy communities in apple orchards in South-east France**, Agriculture for Sustainable Development (revisions majeures) ;
- Marliac G, Penvern S, Lescourret F, Capowiez Y; **Crop protection strategies within organic apple orchards influence natural enemy communities and predation of codling moth eggs** ; Biological Control ;
- Marliac G, Simon S, Mazzia C, Penvern S, Lescourret F, Capowiez Y; **Increased grass cover height in the alleys of apple orchards does not promote *Cydia pomonella* biocontrol**; Biocontrol ;
- Malagnoux L; Marliac G; Simon S; Rault M; Capowiez Y; **Management strategies in apple orchards influence earwig abundance and diversity**; Chemosphere

Articles à soumettre à des revues à comité de lecture

- Marliac G, Simon S, Mazzia C, Pasquet A, Thénard J, Hedde M, Penvern S, Lescourret F, Capowiez Y; **Predation of codling moth larvae on the ground of apple orchards and the underestimated role of Opiliones** ; Journal of Pest Science
- Mazzia M, Capowiez Y, Marliac G, Josselin D, Pasquet A; **Spinosad application in apple orchards affects the abundance of the spider *A. diadematus* and its web construction**; Ecotoxicology
- Marliac G, Mazzia C, Pasquet A, Cornic J.-F, Hedde M, Capowiez Y; **The diversity of practices within apple organic production and its effects on the communities of epigeal spiders**; Agriculture, Ecosystems & Environment
- Varennes Y.-D, Marliac G, Bossis C^e, Boyer S and Wratten S. D; **Floral subsidies in the field: foraging pollinators deplete nectar and affect aphid parasitism rates** ; Journal of Animal Ecology

Communication

- Capowiez Y, Mazzia M, Marliac G, Josselin D, Pasquet A; **Spinosad application in orchard affects the abundance of *A. diadematus* and its web characteristics** ; European congress of arachnology

Sommaire

Introduction générale	1
1. L'agriculture biologique	2
1.1. Une définition basée à la fois sur des principes et des valeurs.....	2
1.1. Les évolutions de l'AB.....	3
2. La protection des cultures en AB	4
3. Les services écosystémiques.....	7
4. Le ravageur dans son réseau trophique et les pratiques agricoles	9
4.1. La régulation par la ressource primaire et les pratiques	10
4.2. La régulation descendante et les pratiques.....	11
4.2.1. La relation proie-prédateur.....	11
4.2.2. Les pratiques pouvant influencer cette relation	13
5. Modèles d'étude.....	13
5.1. Les vergers de pommiers du Sud-Est de la France	15
5.2. Les ravageurs principaux et leurs auxiliaires.....	16
5.2.1. Le carpocapse	16
5.2.2. Le puceron cendré.....	18
5.3. Les pratiques de protection en arboriculture biologique	19
5.3.1. Pratiques ayant une action directe sur les ravageurs	20
5.3.2. Une limitation du développement des ravageurs via la plante cultivée	23
5.3.3. Les pratiques visant une augmentation des auxiliaires.....	24
Objectifs et organisation de la thèse	27
Matériel et Méthodes.....	35
1. La zone d'étude	35
3. La sélection des parcelles commerciales	37
4. La parcelle expérimentale	38
5. La caractérisation des communautés biologiques et de la prédation	39
5.1. Les méthodes d'estimation des ennemis naturels	39
5.2. Les organismes sentinelles.....	40
Chapitre 1 : La diversité des stratégies de protection en agriculture biologique et leur impact sur les communautés d'ennemis naturels dans les vergers de pommiers du Sud-est de la France.....	45
The diversity of crop protection strategies in organic farming and their impact on natural enemy communities in apple orchards in South-east France.....	47
Abstract	48
1. Introduction.....	49
2. Materials and methods	50
2.1. Study area and survey	50
2.2. Identification of crop protection strategies	51
2.3. Impact assessment of protection strategies.....	52
2.3.1. Pesticide use and estimated toxicity.....	52
2.3.2. Efficacy of pest control and impact on the natural enemy community	52
2.4. Statistical analysis	53
3. Results and discussion.....	54
3.1. A variety of practices are used by organic apple farmers.....	54
3.2. Typology of crop protection strategies	55
3.3. Links between crop protection strategies and pesticide use	59
3.4. Links between crop protection strategies, pest infestation and natural enemies	60
4. Conclusion	63
Acknowledgments	64

Chapitre 2a : Les stratégies de protection au sein de l'agriculture biologique influencent les communautés d'ennemis naturels et la prédation des œufs de carpocapse.....	67
Crop protection strategies within organic apple orchards influence natural enemy communities and predation of codling moth eggs	69
1. Introduction.....	71
2. Material and Methods	73
2.2. Estimation of codling moth egg predation.....	74
2.3. Monitoring natural enemies.....	74
2.4. Statistical analysis	75
3. Results.....	76
3.1. Pesticide use differs in the three organic crop protection strategies	76
3.2. Effect of the organic crop protection strategy on the natural enemy communities.....	77
3.3. Predation of codling moth eggs	80
3.3.1. Predation rate.....	80
3.3.2. Linking natural enemy abundance to predation rates	81
4. Discussion.....	82
4.1. Different pesticide use within organic farming.....	82
4.2. Crop protection strategy and natural enemy community.....	83
4.3. Natural enemy communities and codling moth egg predation	84
Acknowledgments	86
Chapitre 2b : Infestation par le puceron cendré et les possibles conséquences sur la consommation des prédateurs généralistes.....	89
1. Introduction.....	89
2. Matériels et méthodes.....	90
2.1. Suivi puceron cendré.....	90
2.2. Analyse de contenus stomacaux.....	90
2.3. Analyse statistique	91
3. Résultats.....	92
3.1. Une infestation puceron cendré variable entre verger.....	92
3.2. Shift de ressources pour les prédateurs.....	92
4. Discussion.....	94
4.1. Infestation du puceron cendré.....	94
4.2. La « perturbation » entraînée par la ressource puceron cendré sur la consommation des prédateurs généralistes.....	94
5. Conclusions.....	96
Chapitre 3 : Augmenter la hauteur du couvert végétal entre les rangs de pommiers n'augmente pas le contrôle biologique du carpocapse.....	99
Increased grass cover height in the alleys of apple orchards does not promote <i>Cydia pomonella</i> biocontrol	101
1. Introduction.....	103
2. Material and methods	105
2.1. Experimental orchard and study grass covers	105
2.2. Predation rate of codling moth sentinel eggs in the apple canopy	106
2.3. Natural enemy abundance and diversity	106
2.4. Statistical analysis	107
3. Results.....	108
3.1. The natural enemy community.....	108
3.2. Predation rates	109
3.3. Link between predation and abundance of natural enemies	110
4. Discussion.....	112
4.1. Natural enemy communities.....	112
4.2. Link between sentinel egg predation and natural enemies	113
5. Conclusion	114
Acknowledgments	115

Chapitre 4 : Prédation des larves de carpocapse au sol dans les vergers de pommiers et le rôle jusqu'ici sous-estimé des opilions.....	119
Predation of codling moth larvae on the ground of apple orchards and the underestimated role of Opiliones	121
1. Introduction.....	123
2. Material and methods	124
2.1. Sentinel larvae.....	124
2.2. Video monitoring and analysis	124
2.3. Two study cases	125
2.3.1. Pesticide study case	125
2.3.2. Habitat management study case	126
2.4. Statistical analysis	127
3. Results.....	127
3.1. Predators of codling moth larvae	127
3.2. Decreased pesticide use promotes the predation rate of codling moth larvae.	129
3.3. Increased grass cover height in the alley does not promote the predation rate of codling moth larvae.....	130
4. Discussion.....	131
4.1. What are the predators of the codling moth larvae?	131
4.2. Impact of orchard management	132
Discussion générale	137
1. La diversité des pratiques en AB	137
2. Les communautés d'ennemis naturels	142
3. La prédation	147
Conclusions.....	153
References.....	154

Introduction générale

Introduction générale

Au lendemain de la seconde guerre mondiale, l'agriculture subit de profonds changements dont le but était d'augmenter les rendements et la productivité économique. Elle s'intensifie en utilisant de manière massive des intrants (engrais, produits phytosanitaires de synthèse), des variétés à haut rendement, et en ayant recours de façon importante à la mécanisation. Une augmentation de la productivité en a effectivement résulté, mais avec des conséquences négatives pour l'environnement (diminution de la biodiversité, pollution de l'eau) et la santé humaine (Bonny 2010; Griffon 2007; Matson et al. 1997).

L'utilisation importante de pesticides chimiques pour la protection des cultures est maintenant fortement décriée. La France occupe la 4^{ème} place mondiale et la première place européenne des utilisateurs de pesticides (UIPP). Face à une demande sociétale en faveur d'une agriculture « plus propre » (i.e. ayant moins d'impacts sanitaires et environnementaux), des mesures gouvernementales ont été mises en place comme le Plan Ecophyto 2018 qui vise à réduire de 50% la consommation des pesticides d'ici 2018 si possible. La protection des cultures essentiellement basée sur l'utilisation des pesticides chimiques est donc remise en cause à la fois à cause de ses effets néfastes sur la santé humaine ou l'environnement (Horrigan et al. 2002) mais également parce qu'elle peut entraîner des effets néfastes sur la gestion des bioagresseurs. En effet, le recours massif à l'utilisation des pesticides chimiques, avec souvent un nombre limité de molécules disponibles, exerce une pression de sélection sur les populations de bioagresseurs, entraînant le développement de phénomènes de résistance aux molécules utilisées. De plus, les pesticides sont reconnus en partie responsables du déclin de la biodiversité dans les agroécosystèmes (Crowder et al. 2010; Geiger et al. 2010; Letourneau and Goldstein 2001), entraînant potentiellement une diminution de la régulation naturelle des bioagresseurs.

La production agricole doit donc faire face à de nouveaux enjeux : maintenir ou augmenter la production tout en minimisant les impacts sur l'environnement et la santé humaine. C'est pourquoi des systèmes de production alternatifs attirent notre attention comme l'agriculture de conservation, l'agroforesterie, l'agriculture intégrée, ou l'agriculture biologique (AB).

1. L'agriculture biologique

L'agriculture biologique est souvent considérée comme une des alternatives à l'agriculture conventionnelle et est mise en opposition avec celle-ci. Elle est considérée comme un système plus respectueux de l'environnement qui favorise notamment la biodiversité (Bengtsson et al. 2005; Garratt et al. 2011; Hole et al. 2005; Winqvist et al. 2011). Mais elle est aussi au cœur de controverses récentes en termes de production, de qualité nutritionnelle notamment (Doré et al. 2013; INRA 2013; Rivière-Wekstein 2011).

1.1. Une définition basée à la fois sur des principes et des valeurs

Une diversité de définitions existe pour l'agriculture biologique (AB) (Rigby and Caceres 2001). Une des définitions – à portée internationale – est donnée par le Codex Alimentarius (2007) et définit l'AB comme *« un système de gestion holistique de la production qui favorise la santé de l'agrosystème, y compris la biodiversité, les cycles biologiques et l'activité biologique des sols. Elle privilégie les pratiques de gestion plutôt que les facteurs de production d'origine extérieure, en tenant compte du fait que les systèmes locaux doivent s'adapter aux conditions régionales. Dans cette optique, des méthodes culturales, biologiques et mécaniques sont, dans la mesure du possible, utilisées de préférence aux produits de synthèse, pour remplir toutes les fonctions spécifiques du système »*. L'ensemble des définitions de l'AB met en avant les principes et valeurs définis par l'IFOAM (International Federation of Organic Agriculture Movement, (IFOAM)) :

- Le principe de Santé : L'agriculture biologique devrait soutenir et améliorer la santé des sols, des plantes, des animaux, des hommes et de la planète comme étant une et indivisible ;
- Le principe d'Ecologie : L'agriculture biologique devrait être basée sur les cycles et les systèmes écologiques vivants, s'accorder avec eux, les imiter et les aider à se maintenir ;
- Le principe d'Équité : L'agriculture biologique devrait se construire sur des relations qui assurent l'équité par rapport à l'environnement commun et aux opportunités de la vie ;
- Le principe de précaution : L'agriculture biologique devrait être conduite de manière prudente et responsable afin de protéger la santé et le bien-être des générations actuelles et futures ainsi que l'environnement.

1.1. Les évolutions de l'AB

Depuis les pionniers de l'agriculture biologique (Sir Alber Howard et Rudolf Steiner ont décrits les principes de l'agriculture biodynamique (Steiner 1924)) dans les années 1920, l'AB a subi des évolutions. Darnhofer et al. (2010) décrivent ces évolutions en se basant sur l'hypothèse de « conventionalisation » de l'AB. Ils décrivent alors différentes formes d'AB qui vont des pionniers de l'AB et de l'agriculture biodynamique vers l'AB « conventionnelle » en passant par l'AB certifiée qui apparaît dans les années 1980 (Fig. 1). Ces trajectoires ne sont pas forcément rectilignes et unidirectionnelles comme il l'est représenté dans la figure 1 pour simplification. Cependant ces différents états temporels de l'AB permettent de rendre compte de l'évolution de l'AB mais aussi de sa diversité qui peut être aujourd'hui rencontrée.

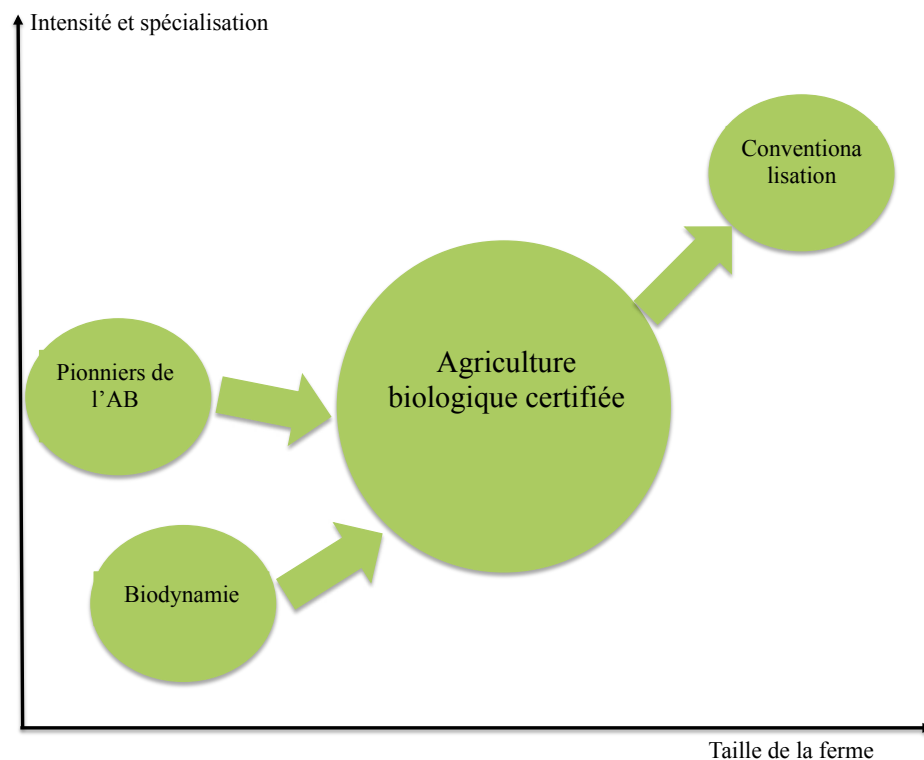


Figure 1. Évolution de l'agriculture biologique selon l'hypothèse de "conventionalisation" (Adapté de Darnhofer et al., 2010).

L'agriculture biologique certifiée apparaît dans les années 80 avec la mise en place d'un cahier des charges qui vient réglementer l'agriculture biologique des pionniers et du mouvement de l'agriculture en biodynamie. L'agriculture **Biodynamique** existe toujours aujourd'hui dans le paysage agricole français. Cette forme d'agriculture se base sur le cahier

des charges de l'AB mais aussi sur un cahier des charges spécifique (Demeter 2014). Ce dernier prône l'utilisation de pratiques plus spécifiques comme des préparations biodynamiques, des tisanes, le respect des rythmes cosmiques et de la nature. Tout comme les pionniers de l'AB, les agriculteurs adhérant à l'agriculture biodynamique basent leur décision sur les valeurs et principe de l'AB. Les considérations économiques sont peu prises en compte. A l'inverse, selon l'hypothèse de « **conventionalisation** », décrite par Buck et al. (1997), l'AB peut devenir une version modifiée de l'agriculture conventionnelle en adoptant certaines de ces caractéristiques au niveau de la production, de la mise sur le marché, de l'industrialisation. Les considérations économiques ont alors une place centrale dans la prise de décision alors que les valeurs et principes de l'AB passent au second plan.

Les motivations poussant à une conversion à l'AB portent sur (i) des questions agronomiques (qualité des sols, problème d'érosion, qualité des produits) (ii) des questions éthiques, religieuses et sociétales, (iii) des considérations environnementales (problème de pollution lié à l'utilisation des pesticides, promotion de la biodiversité), (iv) et des considérations économiques (Geniaux et al. 2010; Padel 2001). Les pionniers de l'AB s'étaient convertis essentiellement pour des raisons agronomiques et éthiques alors que les nouveaux convertis ont franchi le pas en premier lieu pour des raisons économiques (Geniaux et al. 2010).

Outres les motivations personnelles des producteurs, des **facteurs internes** liés à l'exploitant (l'âge, le niveau d'éducation, l'expérience agronomique) ou à l'exploitation (taille de l'exploitation, travail, présence d'une activité hors exploitation, degré de spécialisation, commercialisation) mais aussi des **facteurs externes** (aide publique à la conversion, régulation des prix/quantité, caractéristiques de l'exploitation en termes de climat, de sol, de proximité d'un service de conseil) peuvent influencer la conversion à l'AB.

Pour favoriser la conversion, le gouvernement français a mis en place un programme « Ambition Bio 2017 ». Il a pour objectifs à la fois de doubler les surfaces et d'augmenter la productivité de l'AB d'ici fin 2017 (Programme Ambition bio 2017 2014) afin de répondre à une demande croissante de produits issus de l'AB de la part des consommateurs.

2. La protection des cultures en AB

Les principes de l'AB et notamment le principe d'Écologie sont appliqués en protection des plantes et sont traduits en règles de protection dans le règlement européen RCE 834/2009 qui mentionne que « la prévention des dommages causés par les ravageurs, les

maladies et les adventices se fondent premièrement sur la protection par les ennemis naturels, le choix des espèces et variétés, la rotation des cultures, les techniques culturales et les processus thermaux » et conseille l'utilisation des pesticides seulement « en cas de menace avérée pour la culture ».

La protection des cultures en AB se différencie de celle de l'agriculture conventionnelle par l'interdiction des produits phytosanitaires de synthèse ; seules les substances actives listées dans le règlement CE n°889/2008 sont autorisées. Ce sont des matières actives dites naturelles, elles peuvent être issues d'extraits de plantes ou de microorganismes (bactérie, champignon, virus). C'est le seul point de contrôle qui permet la certification en AB. Mais la protection des cultures en AB n'est pas que basée sur l'application de pesticide, autre différence avec l'agriculture conventionnelle. En effet, elle peut combiner différentes pratiques qui stabilisent et renforcent le fonctionnement de l'écosystème. Ces pratiques limitent le développement des bioagresseurs via la plante ou via les ennemis naturels. Wyss et al. (2005) repris par Zehnder et al. (2007) proposent un système de classification mettant en avant les pratiques à mettre en place prioritairement en AB : (i) les méthodes culturales visant la plante ; (ii) l'aménagement de l'habitat dans le but de favoriser les ennemis naturels, ce qui est un des piliers du contrôle biologique par conservation ; (iii) l'introduction d'agents de biocontrôle (i.e prédateurs ou parasitoïdes) ce qui correspond à la lutte biologique par inondation ; et enfin (iv) l'application de pesticides en dernier recours (Fig. 2).

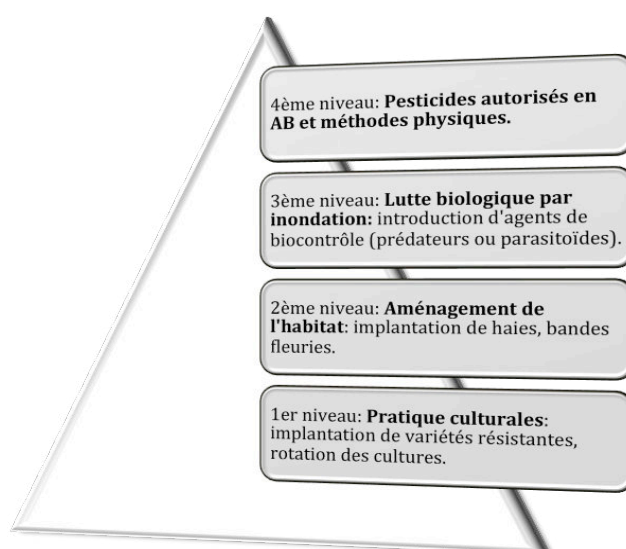


Figure 2. Priorisation des pratiques de protection en AB. La priorité est donnée aux pratiques culturales, la lutte biologique inondative et le recours aux pesticides ayant lieu si les stratégies préventives n'ont pas été suffisantes (adapté de Wyss et al. 2005).

La mise en place de ces pratiques représente une stratégie de protection. Différentes stratégies de protection peuvent donc être mises en place par le producteur selon ses objectifs et ses contraintes économiques et agronomiques (Reganold et al. 2011). Le cadre conceptuel ESR (Efficiency, Substitution, Reconception) permet de formaliser cette diversité de combinaison de pratiques en AB (Hill 2014; Hill et al. 1999) :

- **Efficienc**e : augmenter l'efficacité des moyens de lutte disponibles grâce au développement de technologies qui améliorent leur emploi ou par un meilleur positionnement ;
- **Substitution** : mise en œuvre de méthodes de lutte alternatives remplaçant les moyens chimiques ;
- **Reconception** : mise en place de méthodes préventives et prophylactiques pour défavoriser les bioagresseurs ce qui oblige à une re-conception des systèmes pour les rendre moins dépendants des produits phytopharmaceutiques.

Sur la base d'enquête chez les producteurs, Penvern et al. (2010) ont mis en évidence deux stratégies de protection en vergers de pêchers en AB qui font appel au cadre conceptuel de l'ESR proposé par Hill (1999). Une partie des producteurs mettaient en place une stratégie de type S basée sur la substitution d'intrants chimiques par des intrants autorisés en AB. Alors que l'autre partie basait leurs stratégies de protection sur l'utilisation de méthodes culturales, biologiques et mécaniques et se retrouvaient plutôt dans une stratégie de type R. De même Lamine (2011) décrivait deux stratégies de protection une basée sur la substitution et l'autre sur une re-conception du système.

Cependant, cette diversité des stratégies de protection est souvent négligée. Elle pourrait en partie expliquer que, lors de comparaison AB – agriculture conventionnelle, certaines études ne mettent aucune différence significative en évidence en matière de biodiversité voire même parfois observent des effets négatifs de l'AB (Bengtsson et al. 2005; Hole et al. 2005). Il est attendu en AB une biodiversité plus importante due à l'utilisation de pesticides moins toxiques et à la mise en place de pratiques particulières (comme la mise en place de haie) qu'en agriculture conventionnelle. Or, Hole et al. (2005) dans leur méta-analyse, observent un effet négatif ou une absence d'effet de l'AB par comparaison avec l'agriculture conventionnelle sur l'abondance et la richesse spécifique de certains taxons (fleurs, vertébrés : oiseaux et mammifères) et invertébrés (vers de terre, papillons, araignées, coléoptères, autres arthropodes) dans 8 et 25 cas respectivement sur les 99 études

répertoriées. Ces résultats sont corroborés par la méta-analyse de Bengtsson et al. (2005) qui montre que 16% des études comparant la richesse spécifique des communautés entre AB et agriculture conventionnelle trouvent que cette richesse est plus faible en AB. Malgré cela, l'AB est souvent considérée comme un système unique et, à ce titre, est mise en opposition avec l'agriculture conventionnelle. Notons également que l'on néglige de la même façon la diversité des stratégies de protection en agriculture conventionnelle. Cette dichotomie classique (AB vs agriculture conventionnelle), source de nombreuses publications, peut être remise en question, dès lors que l'on considère la diversité des pratiques et de leurs interactions au sein de ces deux formes d'agriculture et leurs conséquences sur le fonctionnement de l'agroécosystème (Puech et al. 2014; Vasseur et al. 2013).

3. Les services écosystémiques

Les **services écosystémiques** sont définis comme les bienfaits que l'homme tire, directement ou indirectement, du fonctionnement des écosystèmes et des fonctions des espèces au sein de ces écosystèmes, et qui participent au bien-être humain (Costanza et al. 1998; Daily and Matson 2008; MEA 2005). En se basant sur la gestion de des services écosystémiques, **l'intensification écologique** a pour but de conserver ou d'augmenter le rendement tout en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement (Bommarco et al. 2013; Cassman 1999; Doré et al. 2011; Griffon 2007).

Différentes classifications de ces services sont proposées dans la bibliographie, l'une des plus reconnues étant celle proposée par le Millennium Ecosystem Assessment (2005) (Haines-Young and Potschin 2009). Dans cette dernière, les services sont classés en 4 grandes catégories : services d'approvisionnement, de support, de régulation et services culturels. Les services d'approvisionnement comportent par exemple la production d'aliments et de fibres, les services de support la production d'oxygène atmosphérique ou la formation des sols, les services culturels le loisir ou la valeur esthétique des écosystèmes, et les services de régulation le contrôle des bioagresseurs ou la pollinisation. Les agroécosystèmes dépendent de et produisent un certain nombre de services écosystémiques, mais reçoivent et produisent également des « dysservices » comme la compétition pour l'eau ou la pression des bioagresseurs qui réduisent la productivité et/ou augmentent les coûts de production (Zhang et al. 2007). Dans le contexte particulier des agroécosystèmes, où l'homme intervient de façon active pour gérer les dysservices ou maximiser les services, une action sur l'un des services

peut avoir des conséquences sur d'autres services. Par exemple, comme le décrivent Wratten et al. (2012), les mesures environnementales visant à favoriser les pollinisateurs, comme l'implantation de bandes fleuries, ont aussi un effet bénéfique sur la protection de la biodiversité, le contrôle biologique, la qualité du sol et de l'eau et la beauté du paysage rural.

Les services écosystémiques sont générés par des fonctions qui elles même dépendent des structures biophysiques de l'écosystème (modèle en cascade ou « **services cascade** ») (Fig. 3) (De Groot et al. 2010; Haines-Young and Potschin 2009).

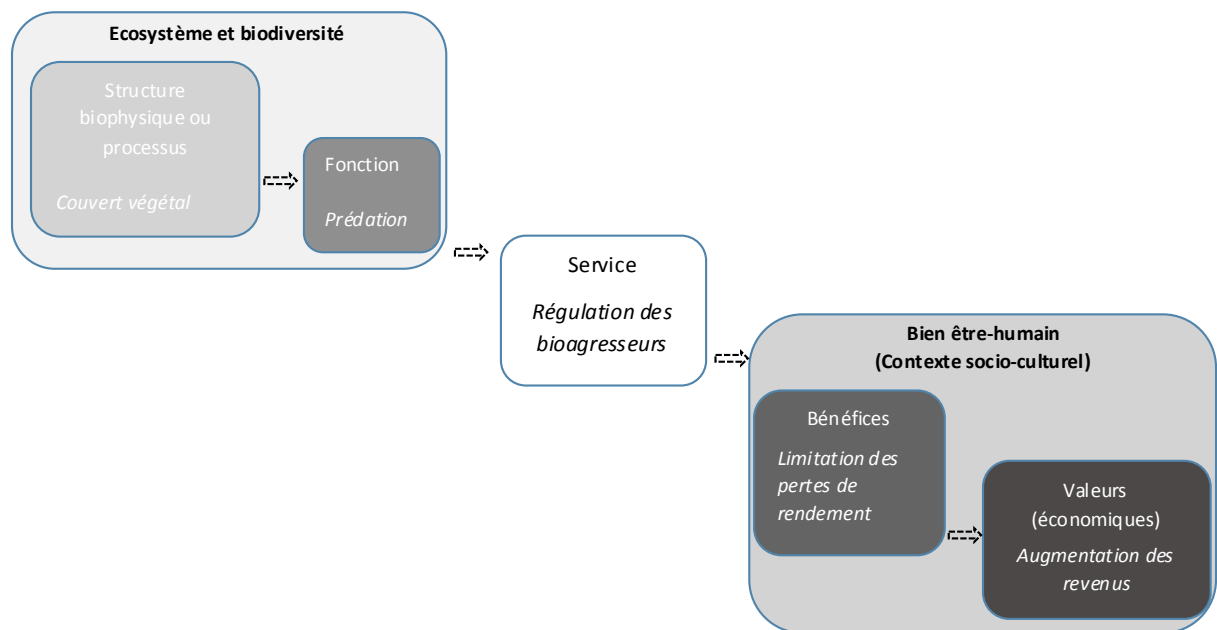


Figure 3. Modèle en cascade des services écosystémiques, en prenant l'exemple du service de régulation des bioagresseurs.

Parmi les services écosystémiques qui influencent le fonctionnement des agroécosystèmes, **les services de régulation** sont particulièrement importants. Parmi eux, **le service de régulation des bioagresseurs** est souvent considéré comme l'un des plus importants (il a été évalué à 417 milliards de dollars (US) par an à l'échelle du globe, selon Costanza et al. 1997). Ce service est rendu par une cascade de fonctions parmi lesquelles on peut citer la fonction de prédation des ravageurs par les prédateurs généralistes. C'est cette fonction qui sera étudiée dans cette thèse. En effet, les ravageurs sont la principale préoccupation en vergers de pommiers (pour des raisons économiques), ils sont donc la cible de nombreux traitements. Leur régulation par les prédateurs généralistes, qui présentent un régime alimentaire diversifié et sont présents lorsque la proie est en faible quantité, représente un enjeu important dans le cadre d'une diminution de l'utilisation des pesticides.

4. Le ravageur dans son réseau trophique et les pratiques agricoles

Pour comprendre et maximiser le service de régulation des ravageurs, il est important de replacer chaque ravageur dans un réseau trophique au sein duquel les interactions influencent la dynamique et le devenir des populations, à travers la disponibilité des ressources et la mortalité due à la prédation.

La régulation ascendante (ou « bottom-up ») est basée sur le niveau trophique inférieur, soit les ressources primaires dans le cas des ravageurs qui sont des consommateurs primaires. L'abondance et la nature des ressources primaires (plante cultivée et plante associée) sont les éléments clés qui régissent l'abondance des communautés des niveaux trophiques supérieurs. La régulation descendante (« top-down ») se base quant à elle sur une régulation par le niveau trophique supérieur et place la prédation au cœur de la régulation des espèces.

Ce réseau est à replacer dans un système agricole soumis à des pratiques agricoles et à l'influence d'un contexte paysager qui peuvent modifier les interactions trophiques (Winqvist et al. 2011) (Fig 4).

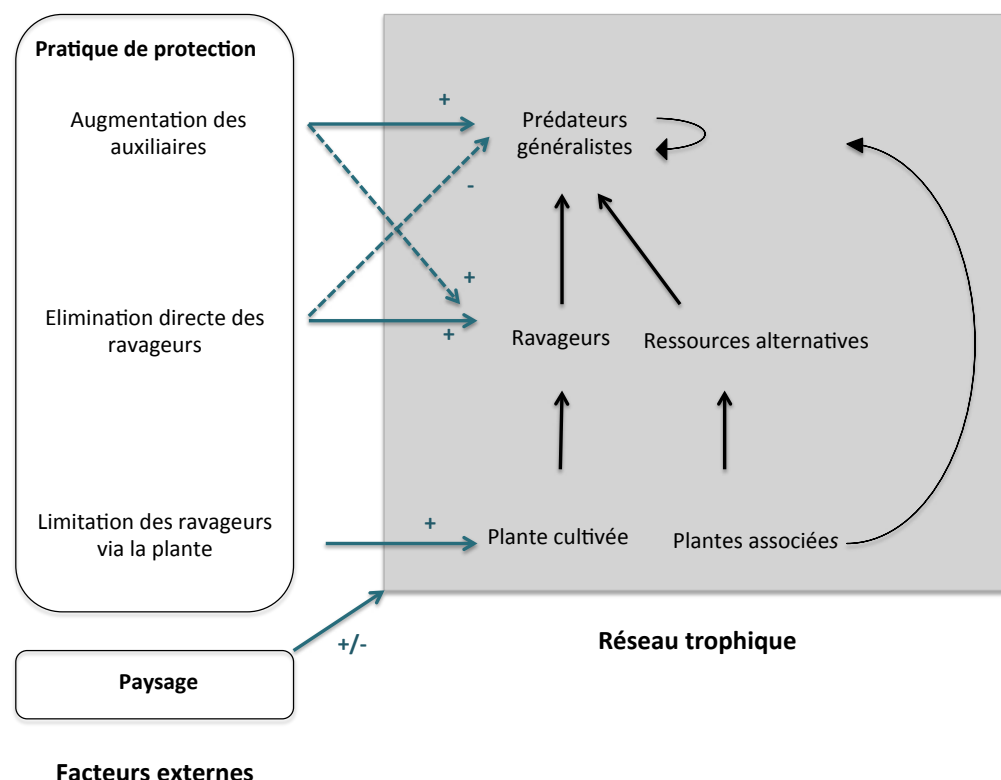


Figure 4. Représentation du ravageur dans son réseau trophique dans un contexte agricole. Ce réseau trophique est sous l'influence de pratiques agricoles dans un contexte paysager donné. Les flèches pleines représentent les effets recherchés lors de la mise en place des pratiques, les flèches en pointillé représentent les relations non désirées induites par la mise en place des pratiques.

4.1. La régulation par la ressource primaire et les pratiques

La relation entre la ressource primaire et le ravageur est un élément important du réseau trophique. Plusieurs leviers peuvent être mobilisés pour limiter l'installation et le développement du ravageur. Ce sont essentiellement des leviers agronomiques, comme le choix de variétés résistantes ou la modulation de la nutrition azotée, qui permettent de stimuler les mécanismes de défense de la plante, ses capacités de compensation et de limiter la pression des bioagresseurs.

La **plante cultivée** et sa gestion sont des facteurs importants dans le développement du ravageur : la variété (la ponte du ravageur peut être influencée par la texture de la surface de la feuille, c'est le cas d'*Helicoverpa zea* sur tomate (Renwick and Chew 1994) ou de *Cydia pomonella* sur pomme (Al Bitar et al. 2012)), la fertilisation (le développement du puceron vert du pêcher (*Myzus persicae*) peut être influencé par la fertilisation (Sauge et al. 2010)), la taille pour les arbres fruitiers (en vergers de pommiers, une taille centrifuge est par exemple défavorable au développement du puceron cendré (Simon et al. 2006)) sont autant de facteurs qui peuvent limiter le développement du ravageur.

La **diversification des ressources primaires** représente un levier important dans la régulation des phytophages (Ratnadass et al. 2012). Plusieurs mécanismes peuvent entrer en jeu dans ce levier : dilution de la ressource et diversion, perturbation du cycle spatial, perturbation de cycle temporel, effets allélopathiques, résistance culturelle, conservation des ennemis naturels, et effets physiques ou architecturaux directs ou indirects de l'efficacité de ponte. Différentes stratégies de diversification existent, qui consistent à mélanger des variétés et/ou des espèces cultivées au sein d'une même parcelle. En arboriculture, le caractère pérenne ne permet de jouer sur les mécanismes de perturbation du cycle temporel en mettant en place des rotations de culture afin d'augmenter la diversité des espèces cultivées et ainsi rompre le cycle des ravageurs comme c'est le cas en grande culture (Mediene et al. 2011) ou en culture légumière (Barrière et al. 2014). En arboriculture, les processus de diversification des espèces cultivées ont peu été étudiées et sont peu mises en place chez les producteurs. Brown and Mathews (2007) ont étudié l'association de pommiers et de pêchers pour limiter le développement du puceron cendré et ont montré que cette association n'augmentait pas le contrôle biologique sur les colonies de puceron cendré.

4.2. La régulation descendante et les pratiques

4.2.1. La relation proie-prédateur

Dans le contexte de régulation des ravageurs, la relation proie-prédateur est souvent abordée par l'étude de la réponse du ravageur à une augmentation de la richesse spécifique de la communauté d'ennemis naturels. La plupart des études se basent sur des dispositifs expérimentaux où la richesse spécifique est augmentée par l'expérimentateur. Les espèces ajoutées dans ces dispositifs sont donc maîtrisées. La relation entre la biodiversité des ennemis naturels et réponse du ravageur peut être positive, neutre ou négative (Finke and Snyder 2010; Letourneau et al. 2009; Straub et al. 2008) (Fig. 5).

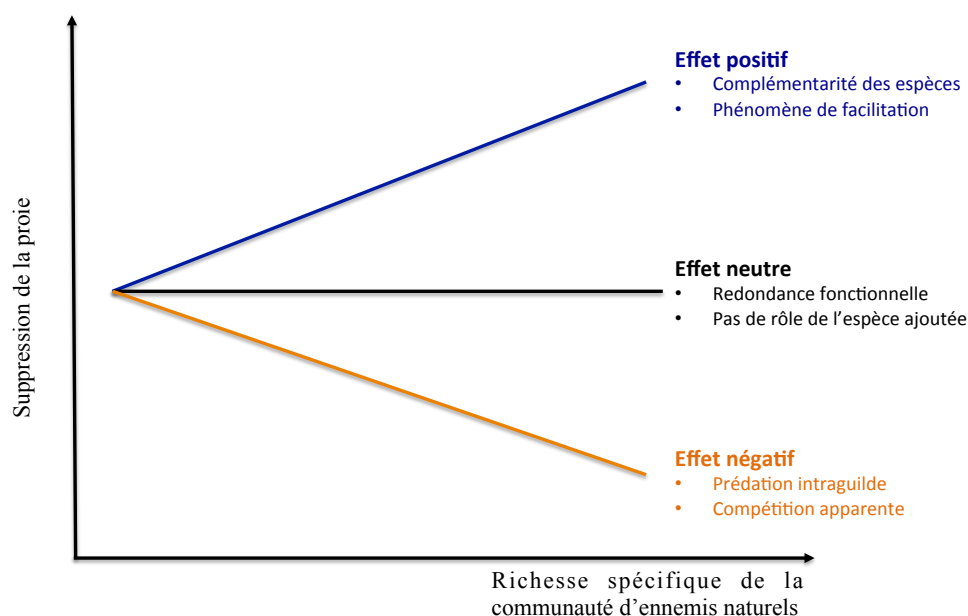


Figure 5. Relation entre la richesse spécifique d'une communauté d'ennemis naturels et l'intensité de suppression des bioagresseurs (Adapté de Straub et al. 2008).

Une augmentation de la richesse spécifique d'une communauté peut se traduire par une diminution de la suppression du ravageur. Des interactions négatives entre prédateurs comme de la prédation intra-guilde ou des interférences comportementales peuvent diminuer la suppression des ravageurs. La présence de ressources alternatives (pollen et nectar, proies alternatives, ravageurs secondaires) constituant le régime alimentaire des prédateurs généralistes peut diminuer la suppression du ravageur cible. Musser et Shelton (2003), en culture de maïs, et Bickerton et Hamilton (2012), en culture de poivrons, ont

montré que la diminution de la prédation des œufs de Lépidoptère était due à la présence d'une proie alternative. Une compétition apparente entre les proies présentes dans le système peut avoir lieu : une interaction indirecte entre deux proies qui sont consommées par le même prédateur.

Une augmentation de la richesse spécifique d'une communauté peut n'avoir aucune conséquence dans la suppression des ravageurs. La (ou les) espèce(s) ajoutée(s) sont alors fonctionnellement redondantes, ces espèces possèdent des traits communs déterminant comment, quand et où elles attaquent leurs proies. Deux conséquences : une compétition entre les espèces ou une (ou plusieurs espèces) ne participe(nt) pas à la suppression du ravageur. Cependant, l'ajout d'une espèce peut ne pas avoir d'effet sur la suppression du ravageur dans un système non perturbé mais avoir un effet positif en cas de perturbation environnementale ou humaine; c'est l'hypothèse d'assurance de Letourneau et al. (2009). Plus le nombre d'espèces est important, plus la chance d'avoir une ou plusieurs espèces capables d'assurer la suppression du ravageur après une perturbation est importante.

Une augmentation de la richesse spécifique d'une communauté peut augmenter la suppression du ravageur. Les espèces sont alors complémentaires: par exemple elles ne consomment pas le ravageur au même moment de son cycle de développement ou de la journée (diurne vs. nocturne) (Pfannenstiel 2008). De plus, des phénomènes de facilitation peuvent être mis en évidence et augmenter la suppression du ravageur (Cardinale et al. 2003).

À travers les mécanismes pouvant expliquer les formes variables de la relation entre « richesse spécifique » et « contrôle des ravageurs », on voit apparaître **l'importance des traits écologiques des espèces de prédateurs** (Straub et al. 2008).

Parmi les traits importants dans la régulation des bioagresseurs, on peut identifier par exemple le mode de chasse (le mode de chasse « sit and wait » chez les araignées, qui ciblent des proies mobiles et ne peuvent donc pas s'attaquer au stade œuf d'un bioagresseur (Cardoso et al. 2011; Markó and Keresztes 2014) ; le degré de polyphagie (plus un prédateur possède un spectre d'hôte important, plus la distraction vis-à-vis du ravageur cible peut être importante) ; la taille du prédateur ; sa capacité de jeûne ; sa mobilité ; son nombre de générations par an (de Bello et al. 2010). De plus, il est important qu'il y ait une synchronisation spatio-temporelle (présence de la proie et du (ou des) prédateur(s) en temps et en lieu (Welch and Harwood 2014).

4.2.2. *Les pratiques pouvant influencer cette relation*

Certaines pratiques de protection peuvent venir perturber cette relation. La perturbation d'un niveau du réseau trophique peut se répercuter sur l'ensemble du réseau et donc sur la suppression du ravageur.

Les ravageurs sont la cible directe des **pesticides** mais ces derniers ont aussi des effets directs (mort) et indirects (toxicité, diminution de la fécondité, diminution de source d'alimentation) sur les prédateurs.

L'aménagement de l'habitat vise à augmenter l'abondance des prédateurs en leur fournissant un lieu de refuge, d'hibernation, d'alimentation (Landis et al. 2000). C'est un des piliers du contrôle biologique par conservation. Des pratiques telles que l'implantation de bandes fleuries, de haies composites, la présence des adventices en grande culture, ou l'enherbement spontané en culture pérenne tendent vers cet objectif.

L'introduction de prédateurs natifs ou exotiques dans le cadre de la lutte biologique par inondation peut augmenter la population de prédateurs dans un système mais aussi perturber la chaîne trophique.

Les parcelles cultivées sont incluses dans un environnement qui comprend un ensemble d'habitats cultivés avec leur propre mode de gestion, et d'habitats non-cultivés présentant chacun leurs communautés et leurs interactions trophiques. Bianchi et al. (2006) montrent que dans 74% des études recensées sur l'impact de la complexité du paysage sur les populations d'ennemis naturels et des ravageurs, les populations d'ennemis naturels sont plus importantes dans un paysage complexe, et que dans seulement 45% des cas la pression des ravageurs est plus faible dans un paysage complexe que dans un paysage simple, ce qui laisse penser que la régulation des ravageurs est complexe et dépendante de nombreux facteurs (densité des ravageurs, climat).

5. Modèles d'étude

Nous avons choisi d'étudier la diversité des pratiques en vergers de pommiers AB et ses conséquences sur les prédateurs généralistes et la régulation des ravageurs (Fig. 6).

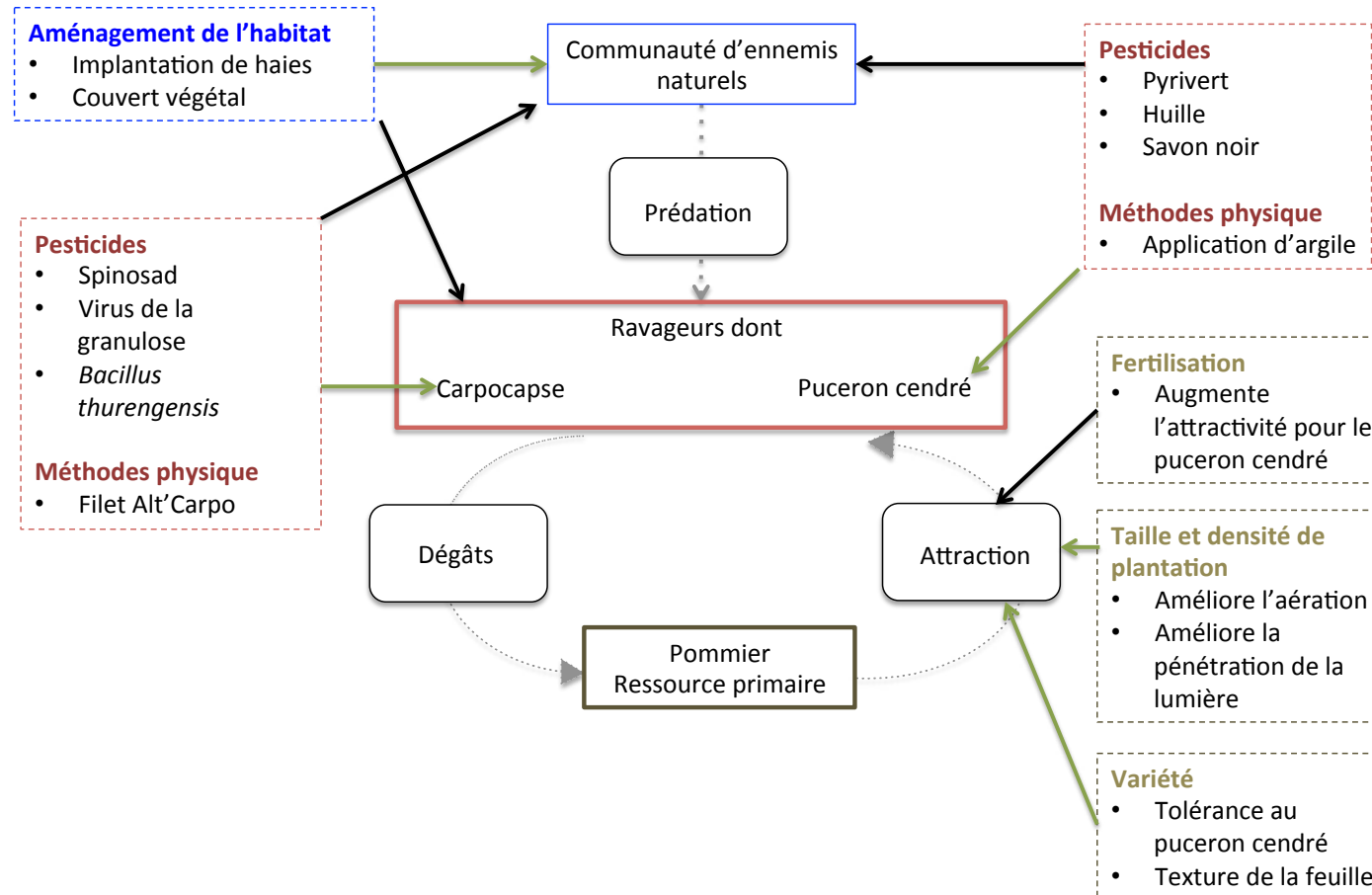


Figure 6. Représentation schématique des effets connus des pratiques agricoles sur les trois niveaux trophiques : plante cultivée, bioagresseurs, ennemis naturels. Les flèches vertes représentent les relations positives et les flèches noires les relations négatives

Nous nous sommes intéressés aux ravageurs du fait de la pression sanitaire qu'ils exercent sur la région, le nombre limité de solutions disponibles pour les gérer, les impasses techniques dans lesquelles se trouvent les producteurs, ce qui leurs confère une importance économique dans la région d'étude.

Nous avons choisis de nous concentrer sur les prédateurs généralistes car :

- une guildes commune est décrite pour les deux ravageurs majeurs de notre étude ;
- ils exercent leur rôle régulateur même en présence d'une faible quantité du ravageur cible, ils assurent leurs maintiens en consommant d'autres proies (régime polyphage).

5.1. Les vergers de pommiers du Sud-Est de la France

Le pommier (*Malus domestica* Borkh) est la 1^{ère} production fruitière de France avec 1788 milliers de tonnes de pommes produites par an. La région PACA est la 1^{ère} région fruitière de France avec 32 milliers d'hectares en 2010 (19% de la production française). Afin de répondre à une demande de la part des consommateurs et des pouvoirs publics, la surface en AB en vergers de fruits est en augmentation dans la région avec 4404 ha en AB (Agreste 2014).

Dans le Sud-Est de la France, le pommier est soumis en moyenne à 35 IFT (Indice de Fréquence de Traitement¹) en agriculture conventionnelle et à 25 IFT en agriculture biologique, avec notamment 15,7 et 14,9 IFT insecticide respectivement en agriculture conventionnelle et AB (Sauphanor et al. 2009).

Malgré cette forte pression phytosanitaire, et par son caractère pérenne, le verger de pommiers offre tout au long de l'année un habitat et/ou des ressources pour les ennemis naturels et les ravageurs, ce qui en fait un cas d'étude intéressant pour étudier la régulation naturelle de ces derniers.

¹ IFT : L'Indice de Fréquence de Traitement est un indicateur de l'intensité de l'usage des produits phytosanitaires calculé comme la somme des rapports entre la dose appliquée pour une surface donnée sur la dose homologuée pour la même surface par traitement

5.2. Les ravageurs principaux et leurs auxiliaires

Dans le Sud-est de la France, les principaux ravageurs en verger de pommier sont :

- les tordeuses (Lepidoptera : Tortricidae) avec principalement le carpocapse des pommes (*Cydia pomonella* L) mais aussi la tordeuse orientale du pêcher (*Cydia molesta* B);
- les pucerons (Homoptera : Aphididae) avec principalement le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea* P.) mais aussi le puceron vert (*Aphis pomi* de Geer) et le puceron lanigère (*Eriosoma lanigerum* H.) ;
- des ravageurs secondaires sont surveillés mais ne représentent pas une préoccupation majeure pour les producteurs : les cochenilles (Homoptera : Coccoidea) et les zeuzères (Lepidoptera : Cossidae).

5.2.1. Le carpocapse

Le cycle de développement du carpocapse (*Cydia pomonella* L.) est schématisé sur la figure 7. Les papillons mâles et femelles, de 18mm d'envergure, se déplacent, s'alimentent, s'accouplent et pondent essentiellement à la tombée du jour. Les adultes se nourrissent essentiellement d'aliments liquides et n'entraînent aucun impact direct sur les cultures hôtes (pommier, poirier, cognassier, noyer).

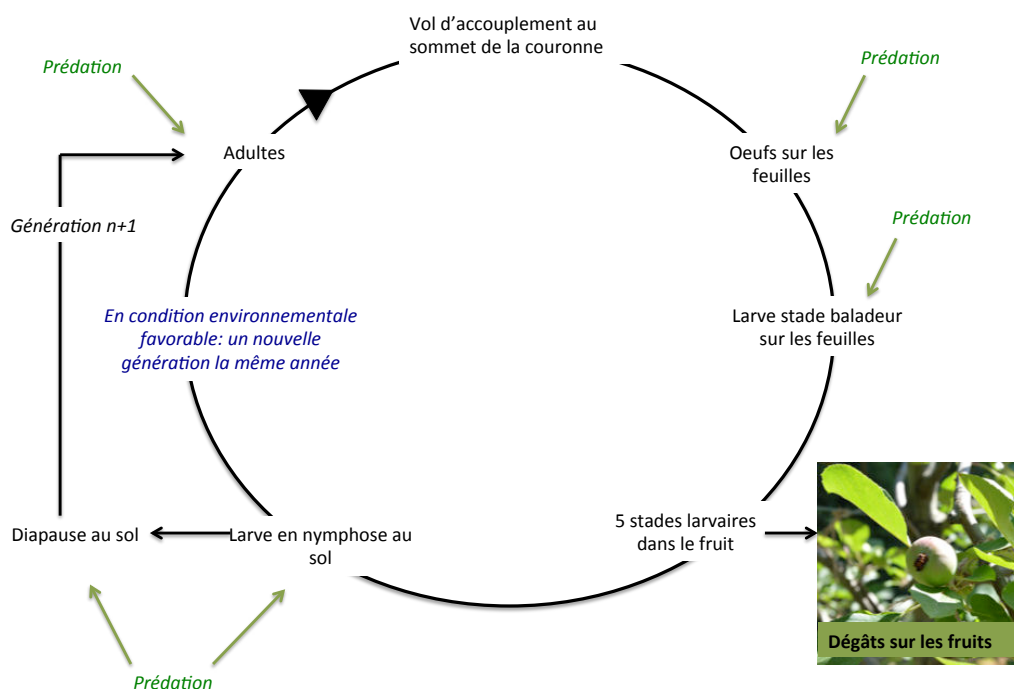


Figure 7. Cycle de développement du carpocapse (*Cydia pomonella* L.).

Suite au vol d'accouplement, la femelle dépose une cinquantaine d'œufs généralement de manière isolée, plus rarement par paquets de 2 ou 3, sur la face inférieure des feuilles à proximité d'un fruit ou plus rarement sur les fruits ou les rameaux. Après une à trois semaines d'incubation selon la température, les œufs éclosent. Les larves cheminent alors vers les fruits et cherchent un point de pénétration durant une phase nommée « stade baladeur » qui dure de 2 à 5 jours. Les larves creusent une galerie en spirale d'abord juste sous la surface du fruit, puis en direction de la zone des pépins. C'est ce stade larvaire qui est responsable des dégâts observés sur fruit et qui les rendent non commercialisables pour le producteur. Cette vie larvaire dure de 20 à 30 jours avec 5 stades successifs. La larve quitte ensuite le fruit et se dirige vers le sol pour trouver un abri, dans le tronc ou le sol, et se rentre en nymphose au sol pour donner une nouvelle génération dans la même saison ou entrer en diapause, selon les conditions climatiques. Dans le Sud-est de la France, on observe de 2 à 3 générations annuelles (Audemard 1991; Balachowsky 1966).

Parmi les stades de développement du carpocapse, certains sont plus exposés à la prédation par les ennemis naturels : le stade œuf et le stade larve au sol. Le stade œuf est le stade le plus important à cibler afin d'éviter les dommages ultérieurs liés à la larve. Les principaux ennemis naturels connus en tant que prédateurs généralistes sont répertoriés dans la table 1 selon les stades de développement du carpocapse qu'ils consomment.

			Ravageurs	
			Carpocapse des pommes	Puceron cendré
Prédateurs généralistes	Araneae	Araneidae	Larves et adultes	1
		Philodromidae	Larves et adultes	1
		Theridiidae	Larves et adultes	1
		Thomisidae	Larves et adultes	1
		Miturgidae	Œufs et larves	
	Coleoptera	Cantaridae	Œufs	1
		Carabidae	Larve	1
		Coccinellidae	Œufs	1
		Elateridae		1
		Staphylinidae		1
	Dermaptera	Forficulidae	Œufs et larves	1
	Hemiptera	Anthocoridae	Œufs	1
		Geocoridae		1
		Miridae	Œufs	1
		Nabidae		1

Table 1. Prédateurs généralistes du carpocapse des pommes et du puceron cendré

5.2.2. Le puceron cendré

Le cycle de développement du puceron cendré (*Dysaphis plantaginea* P.) est schématisé sur la figure 8. Les œufs sont déposés en automne à la base des bourgeons ou sous l'écorce des pommiers et éclosent lors du gonflement des bourgeons. Ils donnent naissance aux fondatrices qui par parthénogénèse donnent des femelles virginipares aptères et ailées. Les femelles virginipares aptères peuvent donner naissance chacune à environ 70 à 80 larves qui deviendront des femelles parthénogénétiques aptères appelées fondatrigenes. Trois à six générations de fondatrigenes vivipares se développent au cours du printemps et jusqu'au début de l'été. Les ailées qui commencent à apparaître fin mai et dont la proportion augmentent jusqu'en juin, migrent ensuite vers le plantain (hôte secondaire). Sur cet hôte secondaire, des sexupares aptères et ailés apparaissent. Ces sexupares reviennent ensuite sur le pommier pour pondre les œufs d'hiver.

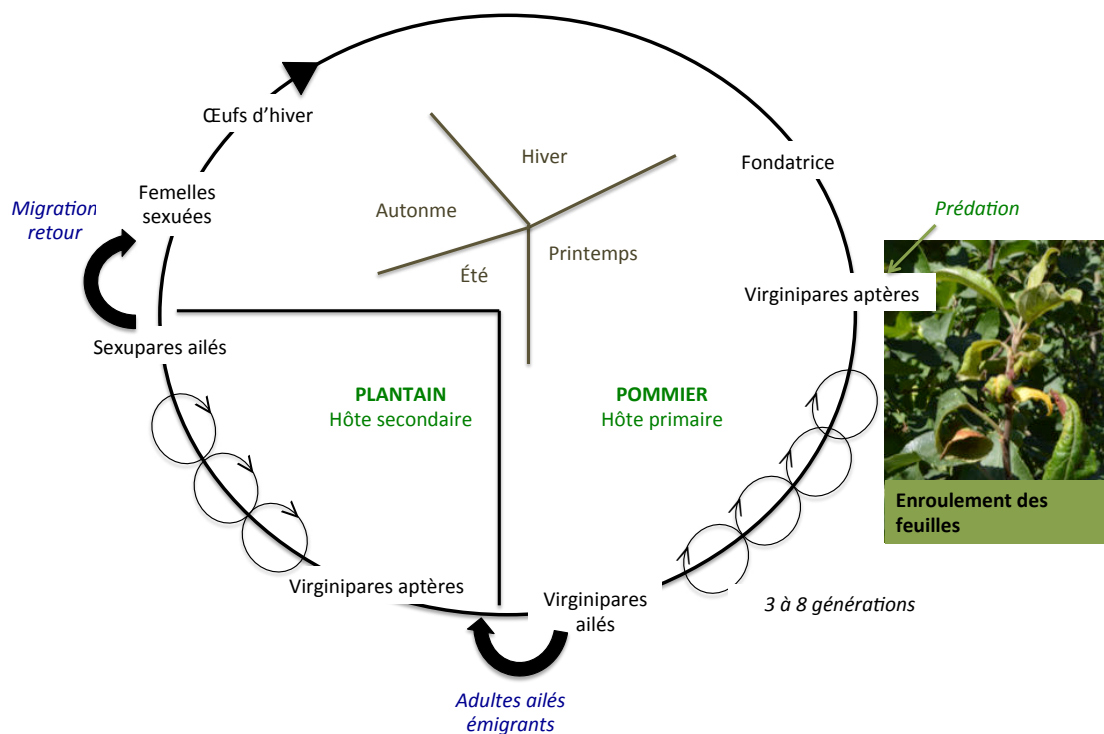


Figure 8. Cycle de développement du puceron cendré (*Dysaphis plantaginea* P.).

Les pucerons sont des insectes de type piqueur-suceur, à stylet perforant, ils ingèrent la sève du phloème (sève élaborée) ce qui provoque de forts enroulements et

des déformations foliaires. Les dégâts persistent après le départ des pucerons, et peuvent compromettre la récolte en cas de forte infestation mais aussi entraîner une diminution de floraison l'année suivante (Blommers 1994; Goggin 2007).

Une des particularités du puceron est son comportement mutualiste avec les fourmis (Hyménoptère : Formicidae). Les fourmis se nourrissent du miellat produit par les pucerons, assurent la défense de la colonie contre les prédateurs potentiels, maintiennent l'hygiène de la colonie en diminuant le développement de champignon entomopathogènes, et assurent le déplacement des colonies (Minarro et al. 2010; Stewart-Jones et al. 2008).

Les principaux prédateurs généralistes du puceron cendré sont répertoriés dans la table 1.

5.3. Les pratiques de protection en arboriculture biologique

Le verger de pommiers est une culture pérenne ce qui implique que certains leviers de gestion des bioagresseurs ne peuvent pas être utilisés. Par exemple, la rotation des cultures utilisée dans le but de rompre les cycles de bioagresseurs en cultures annuelles, est un levier non mobilisable par les producteurs de pommes.

Les pratiques mobilisables par les producteurs et classées selon leur ordre de priorisation par Wyss et al. (2005) impactent les différents niveaux trophiques (plante, ravageurs, ennemis naturels) (Table 2). On distingue trois types d'action : une **action directe** sur le ravageur, une **action sur l'installation et développement** du ravageur via la plante et une **action favorisant l'installation et l'efficacité des ennemis naturels**. Ces pratiques peuvent être mobilisées et combinées pour réduire sous le seuil économique les dégâts occasionnés par les ravageurs.

Niveau d'action				
Pratiques ayant une action directe sur les ravageurs		Une limitation du développement des ravageurs via la plante cultivée		Les pratiques visant une augmentation des auxiliaires
Carpocapse		Puceron cendré		
Niveaux décrits par Wyss et al. (2005)	Pratique culturale	Taille (-)	Variété résistance (-)	Variété résistance (-) Taille centrifuge (-) Fertilisation (+) Densité de plantation (-)
	Aménagement de l'habitat	Destruction du plantain (0)		Haie (+) Couvert végétale (-/+)
	Lutte biologique par inondation	Nématodes entomopathogènes (-)		
	Pesticide biologique	Virus de la granulose (-) Bacillus thuringiensis (-) Spinosad (-)	Pyrèthre (-) Argile (-) Huile (-) Savon noir (-)	Virus de la granulose (0) Bacillus thuringiensis (-) Spinosad (-) Pyrèthre (-) Argile (0) Huile (0) Savon noir (0)
	Méthodes physiques	Filet Alt'Carpo (-)		Filet Alt'Carpo (-/0)

Table 2. Classification des pratiques selon la priorisation proposée par Wyss et leurs niveaux d'action

Les pratiques décrites dans les paragraphes suivants sont celles identifiées comme jouant un rôle dans la régulation des deux ravageurs majeurs, le carpocapse et le puceron cendré, et celles influençant leurs ennemis naturels en AB.

5.3.1. *Pratiques ayant une action directe sur les ravageurs*

En arboriculture AB, peu de produits phytosanitaires sont disponibles pour gérer les bioagresseurs. Pour être utilisés en AB, les produits doivent être inscrits sur la liste positive (règlement CE n° 889/2008). Ces différents pesticides peuvent être issus d'extraits de plantes ou de microorganismes (bactérie, champignon, virus).

Dans la région PACA, la lutte contre le carpocapse se base essentiellement sur l'application du virus de la granulose. Ce virus cible spécifiquement le carpocapse et a donc *a priori* peu d'impact sur la faune auxiliaire. Il a un mode d'action par ingestion. La larve au stade baladeur se nourrit du virus de la granulose disponible sur les feuilles. Le virus se multiplie ensuite dans la larve, entraînant un arrêt d'alimentation puis la mort de la larve. Le positionnement du traitement par le virus est essentiel pour cibler un maximum de larves. Le déclenchement des traitements dans la région se fait sur la base de piégeages par les producteurs ou par un organisme de conseil, et des bulletins d'information reçus par les producteurs. Des cas de résistance au virus de la granulose sont apparus dans les années 2000 (Sauphanor et al. 2005), entraînant la recherche de nouvelles souches du virus et l'alternance des produits ou le changement de stratégie de protection par les producteurs.

La stratégie de lutte contre le carpocapse par le virus de la granulose est souvent couplée à l'utilisation de la confusion sexuelle, si les conditions d'application le permettent, c'est à dire si la surface des parcelles est supérieure à 4 ha. La confusion sexuelle perturbe l'accouplement des adultes. Elle consiste à saturer le milieu de phéromones femelles via des diffuseurs accrochés dans les arbres. Cela perturbe le mâle dans la recherche de la femelle, diminue le nombre d'accouplements et donc la ponte des œufs.

La bactérie *Bacillus thuringensis* (Bt) est quelques fois utilisée pour lutter contre le carpocapse. Comme le virus de la granulose, il a un mode d'action par

ingestion mais n'est pas spécifique du carpocapse et peut donc avoir des conséquences sur la faune auxiliaire (PURE 2013).

Le spinosad est produit par le champignon *Saccharopolyspora spinosa*. Après ingestion par ou au contact de la larve néonate, il attaque le système nerveux de la larve via les récepteurs nicotine acethyl-cholinestérase. Il présente de nombreux effets délétères sur les ennemis naturels (Biondi et al. 2012; Cisneros et al. 2002; Williams et al. 2003).

Depuis 2005, une nouvelle méthode de lutte physique, le filet Alt'Carpo, a fait son apparition dans les vergers de pommiers du Sud-Est de la France. Elle consiste à recouvrir un rang avec un filet mono-rang (Figure 9a) ou une parcelle avec un filet mono-chapelle, moins répandu (Figure 9b), avec un filet de maille 5.4 x 2.2 mm. Leurs mises en place entraînent aussi une modification de la forme des arbres lors de l'installation (Capowiez et al. 2014)). Les filets constituent une barrière physique limitant l'accès à l'arbre pour le carpocapse. Ils perturbent aussi le vol d'accouplement qui a lieu au sommet de la couronne des arbres, réduisant ainsi le succès de reproduction et le nombre d'oeufs déposés si les papillons ont réussi à pénétrer sous les filets (Sauphanor et al. 2012). Dib et al. (2010) ont montré que les filets avaient un effet négatif sur l'abondance et la richesse de certains ennemis naturels associés aux colonies de puceron cendré. L'abondance des coccinelles et des syrphes est notamment diminuée en présence de filets alors que l'abondance des forficules n'est pas affectée (Dib et al. 2010a).



Figure 9. Photo de parcelle avec filet monorang (a) et monoparcelle (b) (Crédit : Guilhem Severac).

L'utilisation de nématodes entomopathogènes (*Steinernema carpocaspae*) est très peu répandue dans la région PACA. Son coût économique est élevé et les conditions d'utilisation sont difficiles à satisfaire : une température de 14°C au

moment du traitement, en condition humide et durant 8 heures. *S. carpocaspae* s'attaque aux larves hivernantes, elle pénètre dans la larve et libère une bactérie qui tue la larve, la rendant ainsi disponible pour le nématode.

La lutte directe contre le puceron cendré est elle aussi limitée. Durant le déroulement de la thèse, seul le pyrèthre était autorisé. Il est extrait des fleurs séchées de chrysanthème. Il a pour cible le système nerveux et présente de nombreux effets délétères sur les ennemis naturels (Jansen et al. 2010). L'application se fait au printemps contre les fondatrices, le positionnement du traitement étant essentiel pour une lutte efficace. Pour l'année 2014, une autorisation a été délivrée pour utiliser l'huile de neem, extraite des graines de neem (*Azadirachta indica*), pour lutter contre le puceron cendré. Il a une action anti-nutritive et insecticide. Des effets délétères sur les auxiliaires sont répertoriés dans la bibliographie (IOBC 2005) notamment sur les coccinelles.

L'application d'huile ou de savon noir au printemps limite le développement des pucerons en enrobant et en étouffant les pucerons et leurs œufs.

Des argiles peuvent être appliquées à l'automne, elles créent une barrière physique sur la feuille. Le dépôt d'une couche blanchâtre entraîne la perturbation des pontes par les femelles, diminuant ainsi l'infestation l'année suivante (Wyss and Daniel 2004).

Certains producteurs, notamment ceux adhérant au cahier des charges Biodynamie, appliquent des tisanes ou décoctions de plantes telles que de la purée d'ortie.

Compte tenu du cycle du puceron cendré et son passage vers le plantain (hôte secondaire) en juillet, la destruction de cet hôte secondaire dans le verger aurait pu être une méthode de lutte efficace pour interrompre le cycle du puceron cendré. Cependant, Brown and Myers (2010) ont montré que les vergers avec une couverture plus importante de plantain ne subissent pas une infestation de pucerons cendrés plus importante. Il n'est pas certain que la gestion du plantain soit efficace à l'échelle de la parcelle individuelle.

La gestion des fourmis avec leur comportement mutualiste peut aussi constituer une méthode de lutte contre le puceron cendré. Pinol et al. (2009) ont exclu les fourmis via des bandes engluées sur le tronc et montré que contrairement à ce qui

était attendu, l'infestation du puceron cendré est plus importante dans les arbres où les fourmis ont été exclues, suggérant que l'exclusion des fourmis entraîne aussi l'exclusion de certains prédateurs tels que les forficules. Nagy et al. (2013) ont manipulé la présence de fourmis dans les colonies de pucerons en leur fournissant une source de sucre alternative (miel), et ont montré que le nombre de pucerons par arbre était moins important dans les arbres où la source sucrée a été apportée. La gestion des fourmis pourrait représenter une solution pour diminuer l'infestation du puceron cendré, tout en prenant garde de ne pas exclure les prédateurs généralistes.

Bien que la gestion des maladies fongiques ne soit pas au cœur de cette thèse, il est important de prendre en compte les traitements appliqués contre celles-ci pour leurs effets délétères sur les auxiliaires. En effet, en AB, les maladies sont principalement traitées avec du soufre et du cuivre dont les effets toxiques sur la faune auxiliaire sont reconnus (Venzon et al. 2013).

5.3.2. Une limitation du développement des ravageurs via la plante cultivée

Le choix de variétés est une étape importante dans la mise en place d'un verger, ce choix se faisant pour une durée longue (20 ans). Outre l'aspect économique et commercial, ce choix est aujourd'hui raisonné essentiellement en fonction de la résistance aux maladies (tavelure), mais des variétés peu appétantes pour le puceron cendré, comme Goldrush, peuvent aussi être implantées (Dib 2010). En ce qui concerne le carpocapse, une surface de feuille avec peu de trichomes (poils à la surface des feuilles) diminue la ponte du carpocapse (Al Bitar et al. 2012).

La taille et la fertilisation azotée sont deux leviers connus pour affecter la croissance végétative de l'arbre et donc sa vigueur. Selon l'hypothèse de vigueur (Price 1991), les performances des pucerons seraient augmentées avec la vigueur de l'arbre. De plus, il a été démontré en verger de pommiers qu'une taille plus aérée, dite taille centrifuge, est défavorable au puceron cendré (Simon et al. 2006). Plusieurs hypothèses sont avancées par les auteurs pour expliquer cet impact sur le puceron cendré : diminution de l'inoculum durant la taille, effet du microclimat de la couronne (augmentation de la pénétration de la lumière entraînant une extinction naturelle), changement de la structure de la couronne entraînant moins de connectivité,

modification des ressources disponibles, meilleure efficacité des pesticides (Simon et al. 2006).

L'augmentation de la densité de plantation peut elle aussi permettre une meilleure aération et pénétration de la lumière provoquant une extinction naturelle du puceron cendré et diminuant ainsi potentiellement l'infestation (Simon et al. 2010).

5.3.3. *Les pratiques visant une augmentation des auxiliaires*

La gestion de l'habitat est un sous-ensemble du contrôle biologique par conservation. Le principe est de modifier l'habitat afin d'améliorer les ressources et les lieux de refuges, d'hivernation et de reproduction nécessaires pour les ennemis naturels. Cette gestion peut avoir lieu dans la culture, dans un environnement proche ou à l'échelle du paysage.

Le verger possède une caractéristique intéressante : il offre un habitat multi-stratifié. Il est composé d'une strate arborée (le pommier) mais aussi d'une strate herbacée. En arboriculture, l'inter-rang est enherbé par un enherbement semé qui est ensuite plus ou moins colonisé par un enherbement spontané. Les études sur la gestion de l'inter-rang ont pour la plupart comparé l'effet de l'installation d'un couvert (enherbement spontané, mulch ou couvert semé) avec un sol nu. Simon et al. (2010) ont fait la synthèse de 22 articles traitant de la gestion de l'habitat en verger : 16 manipulations de l'habitat ont montré un effet positif sur le contrôle d'un bioagresseur, 5 ont eu un effet négatif et 9 n'ont pas eu d'effet.

Dans le sud-est de la France, les haies sont des composantes importantes du paysage. Elles sont surtout implantées pour leur rôle brise-vent et sont très souvent monospécifiques (majoritairement des haies de cyprès *Cupressus* spp.). Des haies pluri-spécifiques, dites haies composites, peuvent être implantées et constitueraient des abris et des lieux d'alimentation plus diversifiés et donc *a priori* plus favorables à la diversité des ennemis naturels (Rieux et al. 1999).

A travers ce modèle d'étude, nous voyons que différentes méthodes de lutte peuvent être combinées dans les temps et dans l'espace et entre ravageurs.

Objectifs et organisation de thèse

Objectifs et organisation de la thèse

L'AB est souvent considérée comme un mode de production favorable à la biodiversité. Cependant la relation AB-biodiversité n'est pas univoque, certaines études montrant un effet négatif ou une absence d'effet de l'AB par rapport à l'agriculture conventionnelle pour certains taxons. Pour expliquer ces réponses si différentes, certains auteurs suggèrent un effet important de la diversité des pratiques mises en place en agriculture biologique. Cependant, si cette diversité a souvent été mise en avant et étudiée d'un point de vue sociologique (Darnhofer et al. 2010; Lamine 2011; Lamine and Bellon 2009; Letourneau and Bothwell 2008), elle n'a jamais été véritablement étudiée du point de vue des performances de régulation des bioagresseurs. Or, cette diversité des pratiques et leurs interactions peuvent avoir des conséquences non négligeables sur les prédateurs généralistes et donc également sur leur fonction de prédation.

Les objectifs spécifiques de ce travail de thèse sont donc :

(i).d'établir un état des lieux de la diversité des stratégies de protection mises en place par les producteurs en AB pour lutter contre les deux ravageurs majeurs en verger de pommiers, le carpocapse des pommes et le puceron cendré et d'identifier les pratiques permettant une diminution de l'usage des pesticides ;

(ii).d'évaluer si ces pratiques permettant une réduction de l'usage des pesticides ont un effet sur les communautés des prédateurs généralistes ;

(iii).d'estimer le rôle fonctionnel des prédateurs généralistes en mesurant la fonction de prédation en vergers de pommiers.

La **démarche** mise en œuvre pour répondre à ces objectifs mobilise différentes approches méthodologiques. Dans un premier temps, des **enquêtes** chez les producteurs ont été menées afin de caractériser la diversité des stratégies de protection en AB et d'identifier les pratiques entraînant potentiellement une diminution de l'utilisation des pesticides biologiques. Dans un deuxième temps, des **observations en parcelles commerciales** ont été réalisées pour identifier les conséquences des pratiques mises en place chez les producteurs à l'échelle de la parcelle sur les prédateurs généralistes et la fonction de prédation.

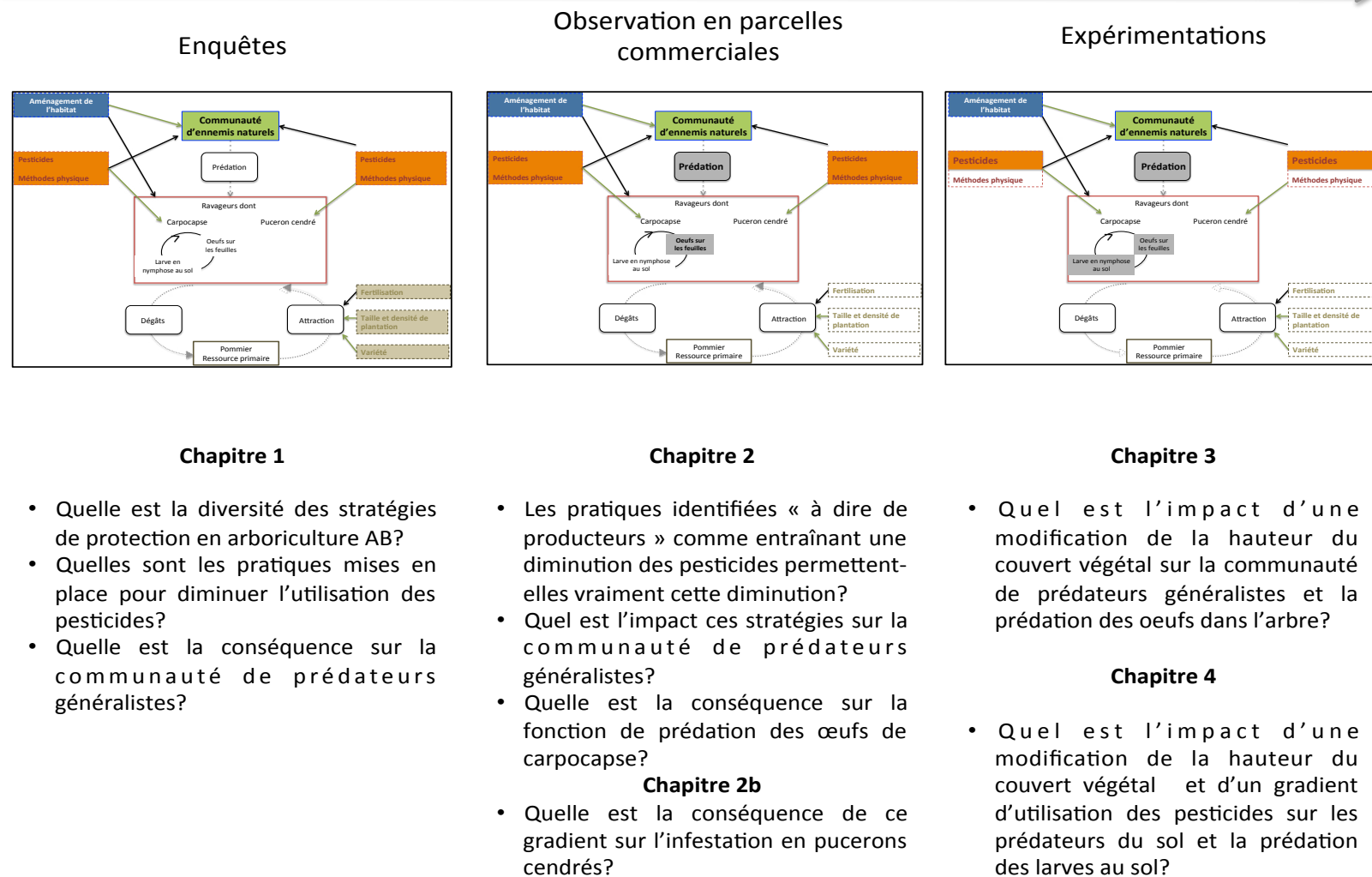


Figure 10 : Organisation de la thèse

Enfin, une **approche expérimentale** a été mise en place afin d'étudier l'impact d'une pratique en particulier sur la communauté des prédateurs généralistes dans l'arbre et au sol et la conséquence sur les fonctions rendues par ces derniers : la prédation des œufs et la prédation des larves respectivement.

Ce travail de thèse s'articule autour de 4 chapitres (Figure 10).

Une gamme de pratiques est disponible pour les producteurs de pommes en AB afin de gérer les ravageurs. Le **Chapitre 1** a permis de réaliser un état des lieux de ces pratiques et de leur combinaison. En se basant sur le dire des producteurs (**Enquêtes**), quatre stratégies de protection ont été décrites. L'analyse de ces stratégies a permis de mettre en évidence que l'utilisation de filets Alt'Carpo et l'application du cahier des charges Agriculture biodynamique s'accompagnaient d'une diminution de l'utilisation des pesticides. Cette caractérisation a constitué un préambule pour la sélection des parcelles commerciales pour les suivis. Nous avons donc cherché à savoir si cette diversité des stratégies de protection avait des conséquences sur la communauté des prédateurs généralistes.

Compte tenu de la réponse non univoque entre les communautés d'ennemis naturels et le contrôle biologique (Straub et al. 2008), la caractérisation des communautés de prédateurs généralistes n'est pas suffisante pour estimer leur rôle au sein du verger. Dans le **Chapitre 2a**, nous avons donc estimé une fonction rendue par les prédateurs généralistes. Le chapitre 1 avait permis de mettre en évidence deux stratégies responsables d'une diminution de l'utilisation des pesticides : le filet Alt'Carpo et l'application du cahier des charges Agriculture Biodynamique. Partant de ce constat, nous avons choisi de suivre des **parcelles commerciales** réparties en 3 groupes : des parcelles avec un filet Alt'Carpo, des parcelles répondant au cahier des charges Agriculture Biodynamique et des parcelles ne possédant aucune de ces 2 caractéristiques. Nous avons caractérisé les 3 groupes en termes d'utilisation des pesticides en analysant les calendriers de traitement, et nous avons également caractérisé un co-facteur important, l'habitat multi-strate caractéristique du verger via la mesure de la hauteur d'enherbement inter-rang et la diversité de composition des haies. Nous avons ensuite estimé la communauté des prédateurs généralistes et mesuré la prédation des œufs de carpocapse sentinelle afin de caractériser l'impact de ces trois stratégies en AB.

Le puceron cendré est un ravageur important en vergers de pommiers en AB. Dans le **Chapitre 2b** nous nous sommes intéressés à l'infestation du puceron cendré au sein de ces mêmes groupes de parcelles. Cette infestation a été mise en relation avec l'abondance de ennemis naturels et l'analyse des contenus stomacaux des ennemis naturels a permis d'identifier les prédateurs du puceron cendré.

Dans le **3^{ème} chapitre**, nous sommes partis du constat que les producteurs disaient moduler la fréquence de fauche du couvert végétal pour favoriser les ennemis naturels dans l'arbre (Chapitre 1), que cela se traduisait par une hauteur différente dans les parcelles commerciales (Chapitre 2) mais que peu de connaissances scientifiques sur l'effet de la gestion du couvert végétal naturel étaient disponibles pour asseoir des recommandations. Grâce à une **approche expérimentale**, nous avons pu moduler la hauteur d'enherbement de l'inter-rang et ainsi tester l'hypothèse selon laquelle une hauteur d'enherbement importante obtenue via une diminution du nombre de fauches, augmentait la faune auxiliaire présente dans l'arbre et la prédation des œufs de carpocapse.

Le cycle de développement du carpocapse passe par un stade larve au sol qui est soumis à la prédation des arthropodes du sol participant ainsi à la régulation du carpocapse. Le **chapitre 4** a permis de faire un focus sur ce stade de développement. Dans deux dispositifs expérimentaux destinés respectivement à modifier la hauteur d'enherbement (même dispositif expérimental que le Chapitre 3) et à étudier un gradient d'utilisation des pesticides (Agriculture conventionnelle > bas intrant > AB), nous avons mesuré le taux de prédation et identifié les prédateurs des larves de carpocapse grâce à l'utilisation de larves sentinelles couplée à l'utilisation de caméras infra-rouges. Ce **4^{ème} chapitre** a donc permis de tester l'hypothèse selon laquelle les prédateurs et la prédation seraient plus importants dans le milieu le plus complexe (i.e., hauteur d'enherbement importante) ou dans un milieu soumis à une moindre pression phytosanitaire.

Une discussion générale et une conclusion seront ensuite proposées.

Ces chapitres font l'objet d'article soumis ou à soumettre :

- Chapitre 1 : « The diversity of crop protection strategies in organic farming and their impact on natural enemy communities in apple orchards in South-east France »; soumis à Agriculture for Sustainable Development ;
- Chapitre 2 : « Crop protection strategies within organic apple orchards influence natural enemy communities and predation of codling moth eggs »; soumis à Biological Control ;
- Chapitre 3 : «Increased grass cover height in the alleys of apple orchards does not promote *Cydia pomonella* biocontrol » ; soumis à Biocontrol ;
- Chapitre 4 : «Predation of codling moth larvae on the ground of apple orchards and the underestimated role of Opiliones» ; à soumettre à Journal of Pest Science.

Matériel et Méthodes

Matériel et Méthodes

Pour répondre à ces questions, différentes approches méthodologiques ont été nécessaires :

- **des enquêtes** chez les producteurs en agriculture biologique de la région pour appréhender la diversité des pratiques ;
- puis des **observations sur certaines parcelles commerciales** de ces producteurs pour étudier les conséquences des différentes pratiques sur l'abondance et la biodiversité des ennemis naturels et leur rôle fonctionnel ;
- enfin **des observations en parcelles expérimentales** (verger de l'INRA) pour étudier spécifiquement l'effet d'un facteur particulier (en éliminant la variabilité liée aux co-facteurs et aux interactions entre facteurs).

1. La zone d'étude

La zone d'étude est située dans le Sud Est de la France (Fig. 11), elle est à cheval sur les départements des Bouches du Rhône et du Vaucluse. L'activité agricole prédominante est constituée par les vergers mais l'on trouve aussi du maraîchage, de la vigne et de l'olivier (Ricci 2009). Parmi les vergers, on retrouve essentiellement des pommiers et des poiriers (87% des vergers pour ces deux espèces), également des abricotiers (7%), des pêchers (1,2%), des cerisiers (1,3%) mais aussi quelques vergers de cognassiers, de noyers, de figuiers, de pruniers... (Ricci 2009).

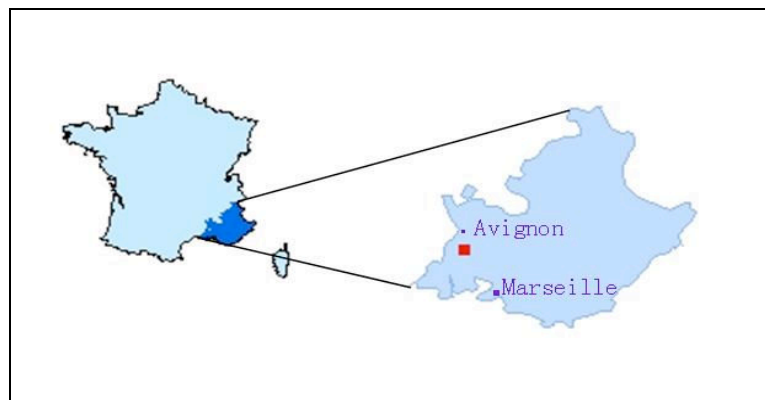


Figure 11. Localisation géographique de la zone d'étude (en rouge)

Cette zone d'étude fait face à une pression sanitaire forte. Le carpocapse est le principal ravageur en vergers de pommiers, suivi par le puceron cendré (Objectifs info Arbo 2014) notamment en agriculture biologique. Les producteurs en agriculture biologique font face à des impasses techniques avec le développement de résistance des populations de carpocapses au virus de la granulose, d'un nombre limité de produits phytosanitaires autorisés en AB pour lutter contre le puceron cendré. La forte pression du carpocapse a entraîné une caractéristique particulière dans la région : le développement des filets Alt'Carpo (Alt'Carpo 2014). Une autre caractéristique de la zone d'étude est la présence du mistral (vent nord-sud fréquent et fort). Cette caractéristique climatique a pour conséquence une caractéristique paysagère : un réseau important de haies. La composition des haies peut varier : certaines sont composées majoritairement d'une seule espèce, le cyprès, alors que d'autres sont plurispécifiques ayant été plantées volontairement ou non (Ricci 2009).

2. La création d'un réseau de producteurs en AB.

Pour étudier la diversité des stratégies de protection mise en place en AB, il a été nécessaire de mettre en place un réseau de producteurs en AB. En effet, il n'existe pas en arboriculture une base de données répertoriant les pratiques des arboriculteurs. Deux étapes se sont succédées pour créer ce réseau. Nous avons dans un 1^{er} temps mobilisé les réseaux de producteurs disponibles dans l'équipe d'accueil (Plantes et système de cultures horticoles PSH). La zone atelier Basse vallée de la Durance décrite dans la thèse de Benoit Ricci (2009) et la zone Alt'carpo mise en place par Guihlem Severac pour étudier l'impact des filets Alt'carpo sur différentes composantes du système (microclimat, ravageurs, maladies) dans le cadre d'un projet financé par le MEDDAT: « Impacts agronomiques et environnementaux d'une méthode de lutte permettant de réduire fortement l'usage des pesticides : les filets Alt'Carpo en arboriculture » (Capowiez et al. 2014).

Dans un deuxième temps, nous avons pris contact avec les conseillers techniques de différents organismes de conseil privé ou public de la région sud-est : la chambre d'agriculture, un groupement de producteurs (G.R.C.E.T.A de Basse Durance), un organisme de recherche (Groupe de Recherche en Agriculture Biologique GRAB), des structures de conseil privées (Chant des Arbres). Lors des entretiens avec les conseillers techniques nous leur avons dans un 1^{er} temps demandé

de nous décrire le système pommier en AB, ses ravageurs et les pratiques recommandées pour gérer ces derniers. Dans un 2^{ème} temps, nous leur avons demandé des contacts de producteurs représentant la diversité des pratiques mises en place dans leur réseau.

L'ensemble des producteurs identifiés par les différents réseaux mobilisés a été enquêté, aucun critère de sélection n'a donc été appliqué de notre part. Nous avons ainsi enquêté 24 producteurs. Il s'agissait d'entretien semi-directif afin de ne pas influencer les réponses en proposant une liste fermée de réponses possibles. La trame d'enquête présentée dans le table 3 permettait seulement de guider, réorienter, animer l'entretien (Darré et al. 2004).

Discussion générale	Q1 : Qu'est-ce qui a fait que vous êtes passé en bio ? Q2 : Quels problèmes vous avez rencontrés ? Q3: Pourquoi vous avez rencontrés ces problèmes ?
Stratégie de protection	Q4 :Pouvez-vous me citer les 3 principaux ravageurs de vos vergers ? Q5 : Comment vous faites pour les maîtriser ? Q6: Comment vous y prenez-vous ? seuil, diag, choix prod, qui Q7: Y-a-t-il d'autre pratiques culturales qui permettent de maîtriser les ravageurs ? Q8 : Qu'est-ce que vous changeriez si vous deviez refaire votre conversion ?

Table 3. Guide d'enquête

3. La sélection des parcelles commerciales

Suite à l'analyse des stratégies de protection mises en place chez les producteurs, nous avons sélectionné vingt parcelles réparties chez quatorze de ces producteurs (Fig. 12).

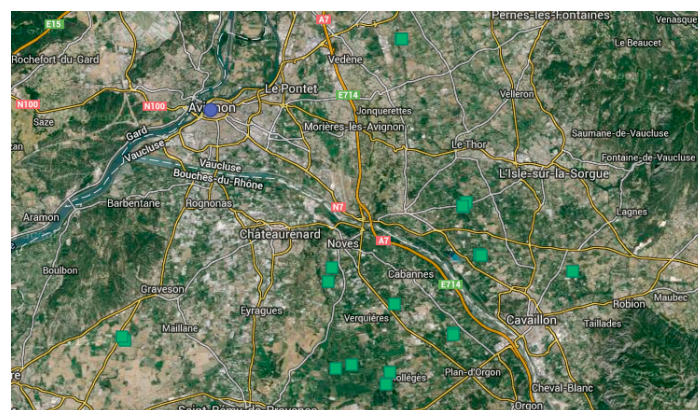


Figure 12. Répartition des parcelles suivies dans la zone d'étude

Plusieurs paramètres sont entrés en considération dans ce choix afin d'avoir un nombre suffisant de parcelles pour caractériser l'impact des stratégies de protection sur les ennemis naturels et leur rôle fonctionnel :

- l'accord des producteurs pour réaliser des suivis sur leurs parcelles ;
- la transmission par les producteurs de leurs calendriers de traitement ;
- la proximité géographique pour minimiser l'impact du contexte géographique (climat, pression sanitaire, sol) lors des suivis mais aussi pour minimiser le temps de déplacement entre les parcelles ;
- la comparaison sur une même exploitation de parcelles où des méthodes alternatives de protection sont mises en œuvre et propices à une diminution du nombre de traitements :
 - insecticides avec l'utilisation de filets Alt'Capo caractéristique dans la région.
 - fongicides (souffre et cuivre) avec la plantation de variété résistante à la tavelure (Akane) comparée à une variété sensible (Gala).

4. La parcelle expérimentale

Le suivi en parcelle commerciale ne permet pas la manipulation d'une ou plusieurs pratiques des stratégies de protection. Le suivi en parcelle expérimentale permet cette liberté. C'est pourquoi le troisième et quatrième chapitre repose sur des suivis en parcelle expérimentale.

Une parcelle est située sur le domaine de l'INRA d'Avignon. Elle a été plantée en 2007 avec la variété résistante Akane. Elle est bordée par une haie composite (Debras et al. 2007) et par un verger d'abricotiers de l'autre.

Dans ce verger, 3 modalités de hauteurs d'enherbement : jamais tondu, maintenu à 20 cm et maintenu à 5 cm, ont été définies (Fig. 13).

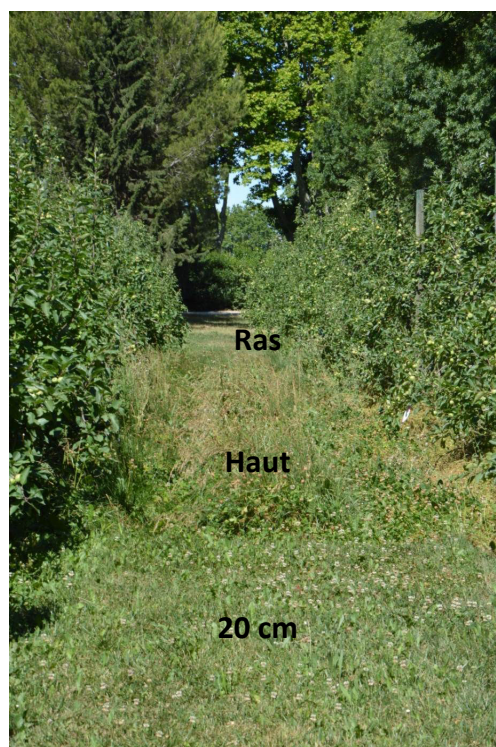


Figure 13. Modalité d'enherbement

Un autre dispositif expérimental se situe à l'INRA de Gothéron. Il s'agit d'un système où trois modalités de pesticide sont appliquées : agriculture conventionnelle, bas intrant et AB (Simon et al. 2011).

5. La caractérisation des communautés biologiques et de la prédation

Les mesures biologiques réalisées sont identiques sur les parcelles commerciales en 2012 et sur la parcelle expérimentale en 2013.

5.1. Les méthodes d'estimation des ennemis naturels

La présence des ennemis naturels dans la couronne de l'arbre a été estimée avec la méthode des bandes pièges en carton ondulé. Ces dernières sont posées, à hauteur d'homme, sur une branche de l'arbre à proximité du tronc. La pose consiste à enrouler autour de l'arbre une bande de carton ondulé de 10 cm de largeur et de la fixer avec du ruban adhésif (Fig. 14). Les bandes sont laissées dans le verger quinze jours, puis récoltées individuellement dans des sacs en plastique. Chaque bande est numérotée selon le verger, le numéro de la ligne et l'arbre dans lesquels elles se

situent. L'ouverture de ces bandes se fait en laboratoire, les arthropodes trouvés à l'intérieur sont stockés dans l'alcool à 70°C pour une identification ultérieure.



Figure 14. Bande piège dans la couronne

Dans le chapitre 4, la faune au sol a aussi été suivie, pour cela des pièges Barber ont été utilisés. Ce sont des pièges activités-dépendant ; Ils contiennent du liquide antigel pour piéger et conserver les arthropodes qui y tombent. Ils sont placés au milieu de l'inter-rang du verger et sont laissés 7 jours avant d'être relevés et triés en laboratoire. La faune du sol a aussi été observée par le biais de caméras placées pour identifier les prédateurs consommant des larves de carpocapse.

5.2. Les organismes sentinelles

La prédation de deux stades du carpocapse a été suivie : le stade œuf et le stade larve au sol. Pour cela des organismes sentinelles ont été produits en laboratoire puis exposés en verger.

Les œufs sentinelles sont issus d'un élevage de masse en laboratoire de carpocapse (Fig 15). La pièce d'élevage est maintenue à 25°C et 40% d'humidité. Les adultes sont placés en cages de reproduction, ils s'accouplent et pondent à la tombée de la nuit. Une feuille de papier type papier sulfurisé (appelée feuille de ponte) est placée verticalement sur la partie droite de la cage de reproduction. Les feuilles de ponte sont utilisées à deux fins : produire les œufs sentinelles et assurer le maintien de l'élevage. Pour assurer le maintien de l'élevage, les feuilles de pontes sont placées au dessus d'un milieu nutritif (Guennelon et al. 1981), les larves néonates colonisent le milieu via un fil de soie et se développent jusqu'à l'émergence des adultes.

Les feuilles de pontes servant pour la production des œufs sentinelles sont passées aux UV pendant vingt secondes pour stériliser les œufs et ainsi éviter l'éclosion d'œufs en vergers de pommiers. Une seconde précaution est prise afin d'éviter la prolifération du ravageur dans les vergers si l'éclosion avait lieu : les souches de carpocapse utilisées sont des souches dites sensibles. Ces souches ne présentent pas de résistance au virus de la granulose. Les populations issues de ces éclosions involontaires seraient alors rapidement contrôlées en vergers.

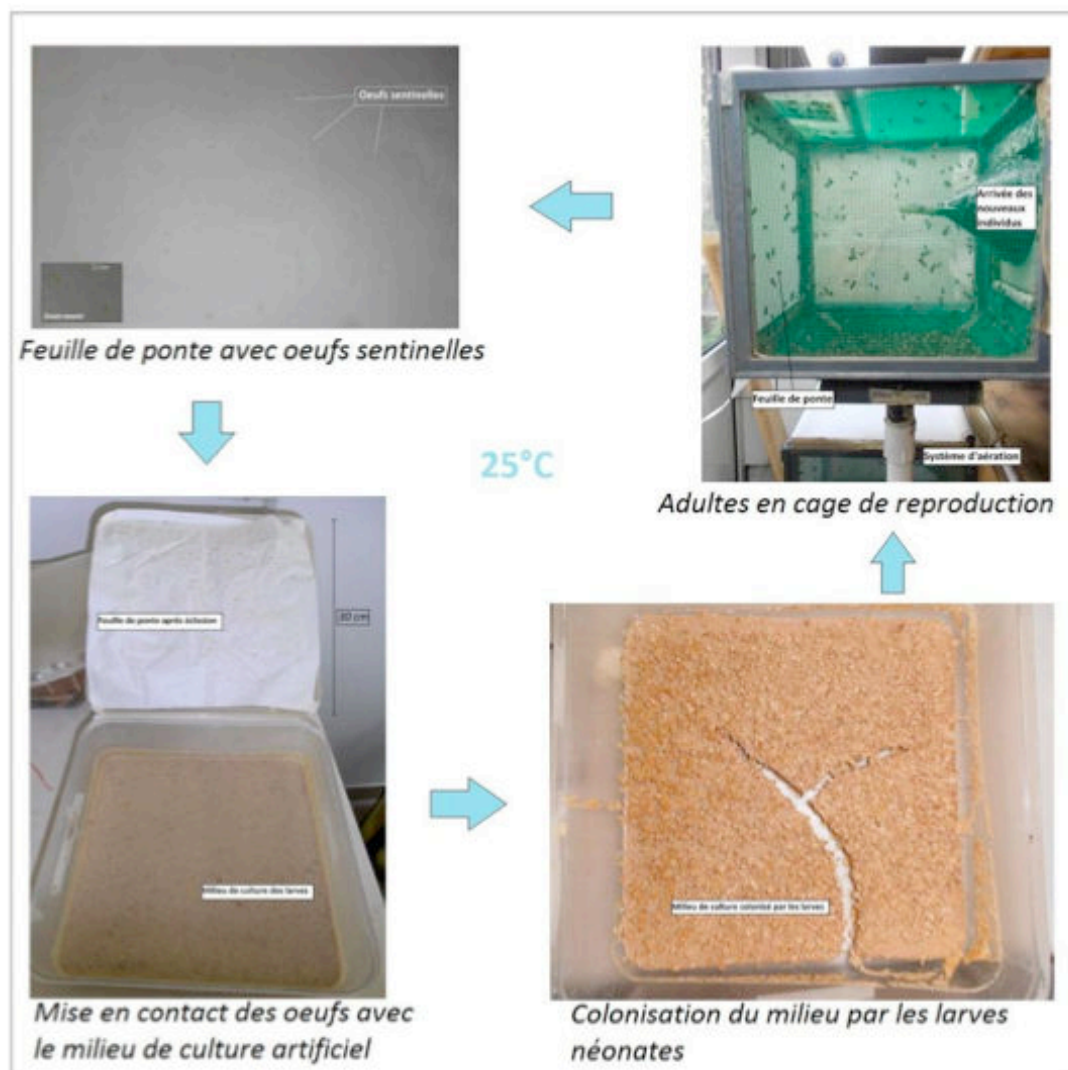


Figure 15. Schéma de production des œufs de carpocapse (Credit INRA)

Les feuilles de ponte sont ensuite découpées en bandelette de 7 à 13 œufs pour être exposées en verger. Le nombre d'œufs par bandelette est inscrit sur chaque bandelette avant l'exposition. En verger, elles sont agrafées, à hauteur d'homme, sous la surface des feuilles à proximité d'un fruit afin de mimer la localisation des œufs

naturels de carpocapse. Les œufs sont exposés durant deux jours et demi pour limiter le risque d'éclosion. Pour faciliter le récolte des bandelettes (et ainsi ne pas laisser de bandelette sur le verger), elles sont repérées dans le verger par un triple balisage : l'arbre est marqué par un lien vert, le rameau est identifié par de la rubalise, la feuille est identifiée par une bague de marquage (Fig. 16). A la récolte des bandelettes, chacune d'elle est identifiée avec le nom du verger, la ligne et l'arbre où elle était située. Les bandelettes sont ensuite conservées au congélateur à -20°C avant la lecture. La lecture consiste à comptabiliser le nombre d'œufs restant sur la bandelette sous une loupe binoculaire. Le taux de prédation est calculé en faisant le rapport entre le nombre d'œufs consommés (nombre d'œufs restant – nombre d'œufs initiaux) et le nombre d'œufs initiaux.

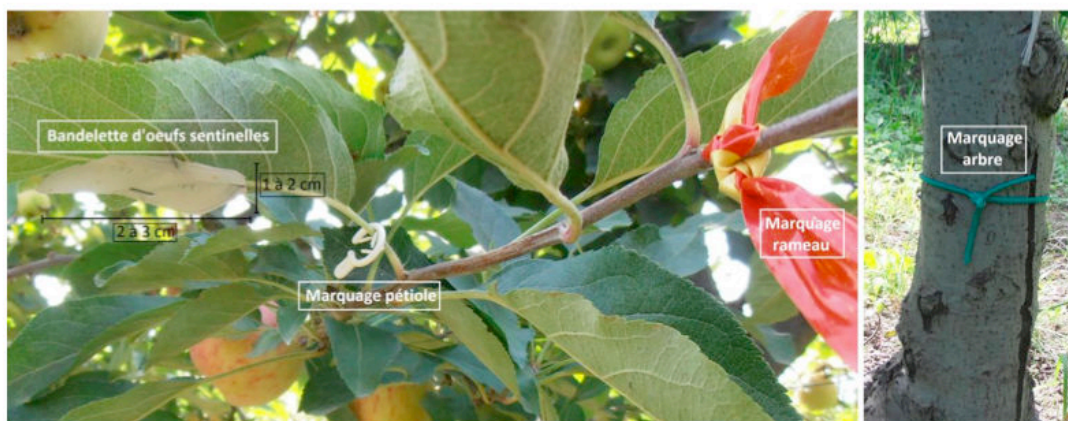


Figure 16. Bandelette d'œufs sentinelles et système de marquage (Crédit Alexandre Camuel)

Les larves sentinelles sont des larves au dernier stade de développement (L5). Elles sont obtenues en plaçant une feuille de ponte au dessus du milieu nutritif. Les larves L5 sont ensuite pinsées avec des pins insecte 00 sur des cartons de 4*3 cm. Les larves sont placées entre les rangs des vergers de pommiers (Fig. 17), à la tombée de la nuit et pendant 2 heures. La tombée de la nuit correspond à la période où les larves descendent naturellement de l'arbre pour trouver un abri dans le sol (Balachowsky 1966). Le nombre de larves consommées est comptabilisé au bout de deux heures ce qui permet de calculer un taux de prédation.



Figure 17. Larves sentinelles exposées en verger de pommiers

Chapitre 1 :

La diversité des stratégies de protection en agriculture biologique et leur impact sur les communautés d'ennemis naturels dans les vergers de pommiers du Sud-est de la France

Chapitre 1 : La diversité des stratégies de protection en agriculture biologique et leur impact sur les communautés d'ennemis naturels dans les vergers de pommiers du Sud-est de la France.

L'agriculture biologique (AB) est souvent considérée comme un modèle, un prototype pour une agriculture durable (Bellon and Pervern 2014). Selon la définition du codex elle doit « *favoriser la santé de l'agrosystème, y compris la biodiversité, les cycles biologiques et l'activité biologique des sols* ».

En agriculture biologique, la mise en place des pratiques par les producteurs est dictée par l'application de ces principes et par un cahier des charges mais n'est pas imposée, ce qui laisse une marge de manœuvre et donc crée potentiellement une diversité de stratégies au sein de ce mode de production avec des conséquences possibles sur la biodiversité. Puech et al. (2014) ont cherché à décrire cette diversité des stratégies de gestion mises en place en AB et agriculture conventionnelle en prenant l'exemple de la culture de blé et en se basant sur des enquêtes auprès de 20 producteurs en AB et 20 producteurs en agriculture conventionnelle. Ces auteurs n'ont pas réussi à mettre en évidence différentes stratégies de protection au sein de l'AB et au sein de l'agriculture conventionnelle. Ils suggèrent que, dans leur cas d'étude, les stratégies de protection relèvent d'un choix individuel plutôt que d'une tendance globale. Cependant, en considérant dans la même analyse, les deux modes de production AB et agriculture conventionnelle, la spécificité de chaque mode de production est masquée par la forte distinction entre les deux modes. En effet, certaines variables sont exclusives à un mode de production ce qui permet de séparer les deux modes de production mais pas de mettre en évidence des stratégies au sein de chaque mode de production. Par exemple, l'utilisation d'herbicide est interdite en AB ce qui en fait une variable caractéristique de l'agriculture conventionnelle. Il en est de même pour les fertilisants chimiques ou les régulateurs de croissance. Pour éviter cette difficulté et tenter de mettre en évidence une diversité des stratégies de protection en AB, nous avons considéré uniquement des producteurs en agriculture biologique. A contrario, en focalisant nos forces sur un des modes de protection, nous avons pris un risque en matière de valorisation tant il est vrai que les différences entre

les deux modes de production restent très marquées et permettent donc d'obtenir plus facilement des résultats « positifs ».

Dans ce chapitre nous avons donc voulu tester les hypothèses suivantes :

- (i) Une diversité des stratégies de protection existe en AB ;
- (ii) Elle se traduit par une utilisation différente des pesticides AB ;
- (iii) Cela a pour conséquence des communautés d'ennemis naturels différentes dans la couronne des vergers.

The diversity of crop protection strategies in organic farming and their impact on natural enemy communities in apple orchards in South-east France

Marliac Gaëlle^{a*}, Penvern Servane^b, Barbier Jean-Marc^c,
Lescourret Françoise^a, Capowiez Yvan^a

Soumis à Agronomy for Sustainable Development

^a INRA, UR1115 Plantes et Systèmes de culture Horticoles, Domaine St. Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 09 France

^b INRA, Unité Ecodéveloppement, Site Agroparc, Domaine St. Paul, 84914 Avignon, Cedex 09, France

^c INRA, UMR Innovation - 2, Place Pierre Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France

Corresponding author:

Marliac Gaëlle

INRA, UR1115 Plantes et Systèmes de culture Horticoles, Domaine St. Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 09 France

gaelle.marliac@avignon.inra.fr

Abstract

Organic agriculture can increase the biodiversity and abundance of pest's natural enemies. This conclusion is based on the results of numerous studies comparing conventional and organic agriculture. However, in general these studies ignored the wide range of practices within organic agriculture. To fill this gap, we first characterized crop protection strategies within organic apple production systems. We then tested whether these strategies led to any differences in (i) pesticide application rates and estimated toxicity, and (ii) populations of pests and their natural enemies. We identified four crop protection strategies, which were characterized by a specific combination of different types of practices. The « Ecologically intensive strategy » promotes natural enemy numbers by managing their habitat. The « Substitution strategy » is mainly based on pesticide usage. The « Technologically intensive strategy » uses innovative technological methods such as exclusion nets. The « Integrated strategy » mobilizes a wide range of different practices. The « Technologically intensive strategy » and the « Ecologically intensive strategy » reduced pesticide usage and toxicity compared to the « Integrated strategy » and the « Substitution strategy ». For the technologically intensive strategy, the use of scab-resistant apple cultivars and Alt'Carpo net exclusion led to a decrease in pesticide usage. We showed that natural enemy communities and their efficacy were clearly influenced by these strategies. The presence of some predators could be related directly (Coccinellidae) or indirectly (Thomisidae and Gnaphosidae spiders) to pest infestation rates. The abundance of some predators was influenced by pesticide use: *Forficula pubescens* was associated with orchards with low pesticide use (« Ecologically intensive strategy ») whereas Miturgidae spiders and Chrysopidae were more present in orchards with higher pesticide use (« Substitution strategy »).

Keywords: *Organic agriculture, pesticides, biodiversity, farm typology, intensification, pests.*

1. Introduction

Organic agriculture is assumed to achieve more sustainable practices by reducing the negative environmental impacts of intensive agriculture, such as biodiversity decline (Tscharntke et al. 2005). While positive links between organic agriculture and biodiversity, including abundance of natural enemies, have often been reported (Bengtsson et al. 2005; Garratt et al. 2011; Hole et al. 2005; Winqvist et al. 2011), very little is known about the effect of variability in crop protection strategies within organic production systems although this variability can be high (Letourneau and Bothwell 2008; Penvern et al. 2010). This results in differential impacts on pest numbers and biological conservation and thus opens the way for the development of more ecological and sustainable protection strategies in organic farming.

Organic management strategies can be very complex as they combine, according to Wyss et al. (2005), (i) cultural practices such as fertilizer use (Grechi et al. 2008), (ii) habitat management through hedgerows (Rieux et al. 1999) and ground cover (Landis et al. 2000), (iii) use of biocontrol agents such as *Cydia pomonella* granulovirus (Arthurs et al. 2007), (iv) direct control methods, i.e. pesticides such as Spinosad® (Arthurs et al. 2007). The hierarchy and combination of these different practices aim to limit the development of a wide range of pests. However while some practices, such as fertilizer use (Garratt et al. 2011) or habitat management (Landis et al. 2000), are known to be efficient without any secondary detrimental effects on natural enemies, others, such as pesticide usage, are known to have detrimental effects (Theiling and Croft 1988). These combinations can result in large differences in pesticide use intensity (frequency and toxicity) and these differences are likely to have differing effects on pests and natural enemies.

To gain knowledge about the relationships between different organic crop protection strategies and biodiversity, we conducted a survey in organic apple orchards in South-east France. Orchards are perennial crops and offer favourable conditions for maintaining food webs within the agrosystem and thus provide opportunities for adopting sustainable farming practices (Simon et al. 2010). However, a great number of pesticides are applied to apple orchards with, on average, 29.9 insecticides and fungicides applications in organic orchards in South-East France each year (Sauphanor et al. 2009).

This study had two major objectives. First, we aimed to describe the diversity of crop protection strategies used within organic apple orchards in the region and define the strategies based on novel combinations of the different practices used. Second we investigated the range of the impacts of these different strategies in terms of (i) pesticide application intensity and the estimated toxicity for natural enemies and (ii) pest infestation and the abundance and diversity of natural enemies observed in the orchards. These kinds of relationships have been previously examined in several crops but are often limited to comparisons between organic and conventional production (Bengtsson et al. 2005; Garratt et al. 2011; Hole et al. 2005; Winqvist et al. 2011). Studying such different cropping systems is likely to provide clear answers but neglects the diversity of practices encountered within each cropping system and does not allow the separate effects of each practice to be investigated. To our knowledge the present study is the first to specifically address the diversity of practices available within organic production systems and to assess their effects on pest populations and natural enemy diversity and abundance.

2. Materials and methods

2.1. Study area and survey

The study was carried out in South-east France, where 24% of French apple orchards are concentrated (Agreste 2007), 4% of this area has been converted to organic agriculture (Agence Bio 2012). Insecticides are used against two major pests: (i) the codling moth *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) and (ii) the rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* (Passerini) (Hemiptera: Aphididae). These two pests have different life cycles but share some natural enemies.

We selected and surveyed 24 organic apple farmers identified by local experts (technical advisors of the Chamber of Agriculture and advice organizations) to represent the diversity of the organic apple crop protection strategies in South-east France. Semi-structured interviews were carried out from January to March 2012. We collected data about the farms (farmers' conversion date to organic agriculture, farm size, apple orchard surface area, system of commercialization, conventional and organic mix within the farm) and about their crop protection management at the farm

level. The questionnaire aimed to identify the range of practices used by the farmers to limit pest infestations and promote natural enemies.

2.2. Identification of crop protection strategies

Data from the survey were coded as qualitative descriptors known or assumed to have effects on the two major pests and their natural enemies. Eleven descriptors were selected to reflect the diversity of the farming practices related to crop protection: application of a biological insecticide against codling moth (yes or no) (1), application of a biological insecticide against rosy apple aphid (yes or no) (2), application of kaolin (yes or no) (3), application of homemade herbal teas (yes or no) (4), use of Alt'Carpo net exclusion (3 classes: Net, 0% less or more than 50% of the area covered by Alt'Carpo exclusion net) (5), application of *C. pomonella* granulosisvirus *CpGV* (yes or no) (6), kind of hedgerow planted (2 classes: windbreak hedgerow or composite hedgerow) (7), ground cover management (2 classes: mowed the cover in all alleys orchard or mowed only on alley out of two)(8), area planted with scab- and rosy apple aphid-resistant cultivars (classes: 0, 1-20, 20-60, more than 60% of the area covered by resistant varieties) (9), management of tree vigour (yes or no) and (10) type of thinning method (3 classes: suffer application; suffer application and manual thinning or manual thinning) (11). The Alt'Carpo exclusion net provides a physical protection to prevent codling moth colonization and reproduction (Sauphanor et al. 2012).

Multiple Correspondence Analysis (MCA) was used to analyze the set of descriptors. The three first factors, which explained a significant part of the inertia (52.67%), were retained in this MCA. The farms were identified by their coordinates on these three axes and were then submitted to an ascending hierarchical classification (AHC) using Ward's algorithm of aggregation by variance in order to make homogeneous groups corresponding to a given combination of crop protection practices. To test the significance of the identified groups, we used a between-class analysis (Chessel et al. 2004) followed by a randomization procedure with 99 permutations. We characterized each crop protection strategy by its main practices, identified by the highest contributions on the MCA axes.

2.3. Impact assessment of protection strategies

2.3.1. Pesticide use and estimated toxicity

Treatment calendars were collected for either the 2011 or 2012 season. All pesticide applications were assumed to be at the regulatory-recommended spray rate and concentration unless noted otherwise by the farmers. The number of treatments was calculated per pesticide type (fungicides, biocontrol agent, insecticides since no herbicides are applied in organic farms) and periods of application: pre- and post-bloom (mid-April). The two periods of application were chosen because the Alt'Carpo exclusion nets are closed at the end of flowering (mid-April).

To estimate the toxicity of each pesticide, we used the database of pesticide toxicity on natural enemies developed by the International Organization for Biological and Integrated Control (IOBC 2005). In this database, a toxicity class has been assigned to each pesticide on a scale of 1–4 from lowest to highest mortality. We calculated cumulative IOBC toxicity scores for each orchard (IOBC toxicity index) by multiplying the toxicity class of each pesticide by the number of applications recorded throughout the season and adding up the toxicity scores for all pesticides used (Thomson and Hoffmann 2006).

2.3.2. Efficacy of pest control and impact on the natural enemy community

Pest infestation and natural enemy communities were monitored in a subset of 12 organic apple orchards chosen to be distributed among the different groups of crop protection strategies identified using the method described in Section 2.2.

To monitor rosy apple aphids, five samples at orchard level were taken from mid-April until June 2012 every fortnight. The number of infested trees (i.e. bearing at least one rosy apple aphid colony) was counted for 30 randomly selected trees per orchard and per sample. We derived a cumulative index of infestation (IF) indicating the proportion of infested trees per season and per orchard:

IF = number of infested trees during the season / number of trees observed during the season.

C. pomonella abundance was monitored in each of the 12 orchards at the end of the 2012 season by counting diapausing larvae in 30 corrugated cardboard band

traps wrapped around tree trunks in each orchard (Monteiro et al. 2013). The band traps were installed in mid-July 2012 and collected at the end of October in that year.

The abundance and diversity of natural enemies were estimated seven times in each of the 12 orchards throughout the periods when rosy apple aphid and codling moth are present (from mid-April to end of August). In each orchard, the natural enemies were sampled in 30 corrugated cardboard band traps wrapped around a tree branch, one per tree. Arthropods found in the band traps were stored in 70% ethanol for further identification. According to their relative abundance, we defined different OTU (Observable Taxonomic Units) as earwig populations were described at the species level (Dermaptera: *Forficula auricularia* and *F. pubescens*), spiders at the family level (Araneae, mainly Salticidae, Gnaphosidae, Miturgidae, Thomisidae), while Coccinellidae (Coleoptera, mainly *Adalia bipunctata* L. and *Harmonia axyridis* P.) and Chrysopidae (Nevroptera, *Chrysoperla spp.* and *Hemerobius spp.*) were grouped at order level. As larvae of all these natural enemies are also predators, we pooled those counts with those of adults.

We calculated four common indices to characterize the natural enemy community, expressed as OTUs per orchard: (i) abundance (N); (ii) richness as OTUs; (iii) the Shannon diversity index (H):

$$H = - \sum p_i \cdot \log_2(p_i) \quad \text{where } p_i \text{ is the proportional abundance of the OTU}_i$$

and (iv) the evenness index (E):

$$E = \frac{H}{\log_2 S} \quad \text{where } S \text{ is the OTU richness.}$$

2.4 Statistical analysis

Data from the farmer survey were analyzed using MCA and CAH, which resulted in the definition of four groups of crop protection strategies. We wanted to test the assumption that these groups would result in differences regarding first

pesticide application and toxicity and then pest densities and the abundance and diversity of natural enemies in the subset of 12 orchards. To test these causal relationships, we first performed Principal Component Analysis (PCA) on the pesticide applications and toxicity datasets and drew ellipses for each group on the PCA projection plane (defined by the two two first axes). We then used a between-class analysis (Chessel et al. 2004) followed by a randomization procedure with 99 permutations to test the significance of the groups.

Second, we first performed Principal Component Analysis (PCA) on pest infestation and natural enemy datasets. This was followed by a between-class analysis and a randomization procedure with 99 permutations to test the significance of the groups. For visualization, we drew ellipses for each group on the between-class projection plane (defined by the two first axes). Using the same approach, we also tested the influence of some classic determinants such as farmers' conversion date to organic agriculture, apple surface area, organic surface area, commercialization system, coexistence of organic and conventional farming on the farm. Since none of these determinants showed a significant difference between the four protection strategies, these results are not shown. All statistical analyses were performed using R software (R Development Core Team 2012).

3. Results and discussion

3.1. A variety of practices are used by organic apple farmers

Analysis of the results of the farmer survey identified the variety of practices used to control pests and promote natural enemies. These practices involve very different types of action. Some practices favor bottom-up regulation by controlling pest development through resource availability: (i) the management of tree vigor through fertilization management; (ii) the choice of apple cultivar (e.g., Juliet® a new cultivar, available for organic orchards only, which is resistant to scab and tolerant to the rosy apple aphid); and (iii) manual thinning to limit codling moth populations. Previous studies reported the effect of vigor management on aphid development (Grechi et al. 2008), and the efficiency of tolerant aphids or resistant apple scab varieties towards these pests.

Others practices, which consider factors such as habitat management, are aimed at promoting natural enemies in order to maximize top-down regulation (i.e., pest population reduction by natural enemies). Some farmers planted composite hedgerows (with multispecies composition), which are thought to favor natural enemies compared to windbreak hedgerows (mostly monospecific *Cupressus spp.*) (Rieux et al. 1999). Some farmers managed the ground cover, they mowed only one orchard alley out of two in order to limit physical disturbances, keep flowers in the orchard to provide floral resource subsidies, alternative hosts and prey to attract natural enemies.

Some practices, such as the application of homemade herbal teas (used in biodynamic agriculture (Tassoni et al. 2013), biological agents combined with mating disruption (i.e. *CpGv* or *Bacillus thuringiensis*) and insecticides of biological origin (i.e., Spinosad® and Pyrevert®), directly target pests. Spinosad® is applied according to technical recommendations whereas no thresholds have been identified for Pyrevert® treatment. Repellent agents such as kaolin are sprayed on leaves as physical barriers (Markó et al. 2008).

The Alt'Carpo exclusion net can also be listed in this category, as it provides a physical protection to prevent pest colonization and reproduction (Sauphanor et al. 2012). These nets have increasingly been used since 2005 in South-east France for controlling populations of codling moth (Sauphanor et al. 2012).

3.2. Typology of crop protection strategies

The three first axes of the MCA explained 52.67% of the inertia. The four crop protection strategies (defined by the hierarchical classification) were significantly different ($P = 0.001$; between-class analysis) and characterized by different prioritization of the practices used in the organic apple orchards (Fig. 18).

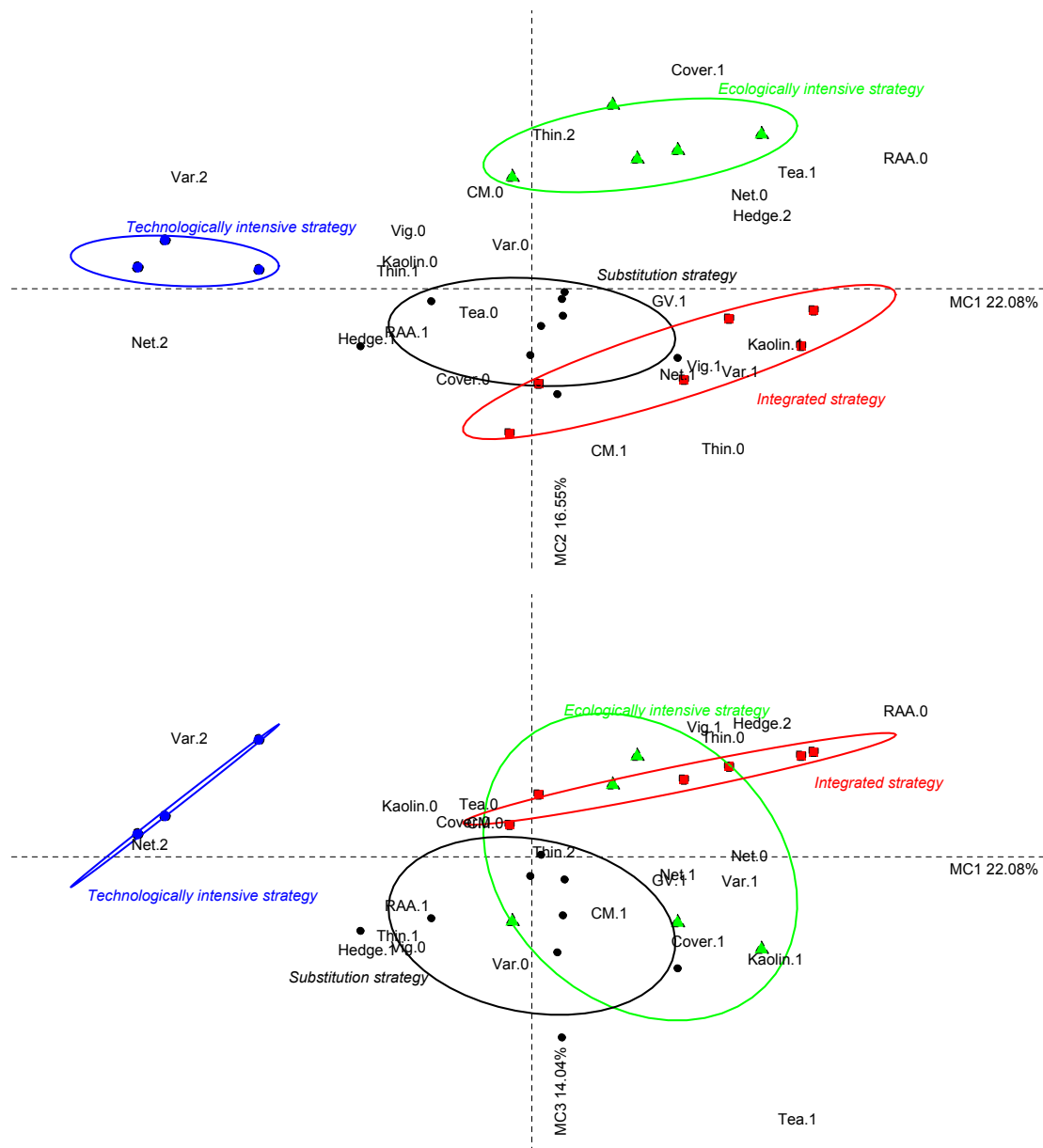


Figure 18. Projections of each farm on the first and second axis (a) and first and third axis (b) of the MCA. Each crop protection strategy is indicated by a variance ellipse (67%). The descriptors for each practice are projected on the first and second axis and first and third axis of the MCA.

The first axis was mainly characterized by the use of Alt'Carpo nets, the application of *CpGV* and the application of a biological insecticide against the rosy apple aphid. It separated the « Technologically intensive strategy » from the other three strategies. The second axis was characterized by ground cover management and the application of Spinosad® against codling moth. It separated the “Ecologically

intensive strategy” and the “Technologically intensive strategy” on the one hand, and the “Substitution strategy” and the “Integrated strategy” on the other hand (see below for a definition of the four groups). The third axis was characterized by planting of resistant cultivars and sorted the “Integrated strategy” and the « Technologically intensive strategy », then “Ecologically intensive strategy”, then “Substitution strategy”.

		Organic crop protection strategy			
		Ecologically intensive	Integrated	Substitution	Technologically intensive
Number of farmer	5		6	9	4
Cultural practice			Management of tree vigor		Resistant Variety
Habitat management	Composite Hedgerow		Composite Hedgerow		
Bioncontrol Agent	Mowed of only one inter-rows out of 2 <i>C. pomonella</i> granulovirus		<i>C. pomonella</i> granulovirus	<i>C. pomonella</i> granulovirus	
Direct method			Biological insecticid against codling moth	Biological insecticid against codling moth	
			Biological insecticid against rosy apple aphid	Biological insecticid against rosy apple aphid	Biological insecticid against rosy apple aphid
Net exclusion			Net exclusion	Net exclusion	Net exclusion
Number of pre-bloom pesticide application (mean and range)	4.12 (2.5 - 7)		6.12 (4.5 - 10)	10.95 (7 - 15)	6.25 (3 - 9)
Number of post-bloom pesticide application (mean and range)	15(9 - 19)		20 (15 - 25)	21 (11 - 51)	4.5 (2 - 7)
IOBC toxicity index (mean and range)	37.37 (27.5 - 54)		60.75 (47 -79)	78.82 (51 - 125)	31.25 (29 -33)

Table 4. Main differences in crop protection strategies used in apple orchard in the South-East of France. Each crop protection strategy is characterized by the practices with the highest contributions on the MCA axis.

Farmers implementing the “Ecologically intensive strategy” differed from the others by the importance given to ecologically sound practices. They managed habitats to promote natural enemies by planting composite hedgerows and mowing only one orchard alley out of two. Moreover, these farmers reduced the environmental impacts of pesticides by using biological agents (e.g., *CpGv*) instead of direct methods (biological insecticides) against codling moth (Table 4). This strategy is consistent with the original approach of organic agriculture that promotes indirect or preventive measures (Wyss et al. 2005). In addition, two of the farmers using this strategy follow the principles of biodynamic agriculture. The main difference with classical organic agriculture is the use of biodynamic preparations which contain specific herbs or minerals, treated or fermented with animal tissues (Tassoni et al. 2013). Several authors have discussed biodynamic agriculture as a distinct system from organic production systems (Pfiffner and Niggli 1996; Tassoni et al. 2013).

However, to our knowledge, the organic crop protection strategies and consequences on natural enemies and biological control of biodynamic agriculture have not yet been characterized.

Farmers using the “integrated strategy” implemented a combination of practices to control pests and minimize impacts on natural enemies. They controlled tree vigor and preserved composite hedgerows. To manage codling moth, they used various methods such as biological agents (e.g., *CpGv*), biological insecticides (e.g., Spinosad®), and Alt’Carpo exclusion nets (Table 4). This kind of strategy has already been described in previous studies (Letourneau and Bothwell 2008; Penvern et al. 2010), and is similar to the definition of Integrated Pest Management (IPM) in orchards (Brown 1999). However, the risk of fruit damage (e.g., use of treatment thresholds) was not evaluated in the “Integrated strategy” whereas it is the basis of IPM. This may be related to the limitations in directly controlling pests and diseases with organic products: due to the lower efficacy of most organic registered products, strategies are much more preventive than curative (Simon et al. 2011).

To control pests, farmers using the “Substitution strategy” after conversion to organic agriculture changed their crop protection management from the use of synthetic pesticides to the use of pesticides approved by the organic standards (RCE 889/2008). Against codling moth, they combined the use of biological insecticides with the use of biocontrol agents or used exclusion nets (Table 4). However, compared to the previous strategy, they did not manage the habitat in order to promote natural enemies: all the orchard alleys were mowed and only windbreak hedgerows were planted. The prevalence given to direct control methods is similar to traditional conventional strategies and may illustrate the “conventionalization” thesis observed in organic farming (Hill 1999, Penvern et al. 2010).

The “Technologically intensive strategy” relies on the use of innovative technological methods. This strategy was mainly based on the use of Alt’Carpo exclusion nets and a new resistant cultivar Juliet®. As for the “Substitution strategy”, farmers did not manage the habitat in order to promote natural enemies: all the orchard alleys were mowed and windbreak hedgerows were planted (except at one farm) (Table 4). This strategy has not yet been described in the literature and is here characterized by the intense focus on a small number of methods.

Farmer characteristics, such as education level, experience in agriculture, decision support systems, as well as the known efficacy of methods available to control pests also have an influence on the management practices they adopt (Hubbell and Carlson 1998; Lohr and Park 2002). However, in our study, none of these factors were clearly correlated with any of the four groups.

3.3. Links between crop protection strategies and pesticide use

Within organic production standards, pesticide usage was high and varied significantly (ranging from 10 to 61 application per season). The average number of pesticide applications (23.98 per season) was consistent with the mean values previously reported in the same area (Sauphanor et al. 2009; Monteiro et al. 2013). This resulted in high values for the IOBC toxicity index, which ranged from 27.5 to 125.

The first two axes of the PCA of pesticide applications and IOBC toxicity explained 65.18 % of the total inertia (Fig. 19 and Table 4). The between-class analysis analysis and the permutation test showed a significant difference between the groups (p-value=0.01).

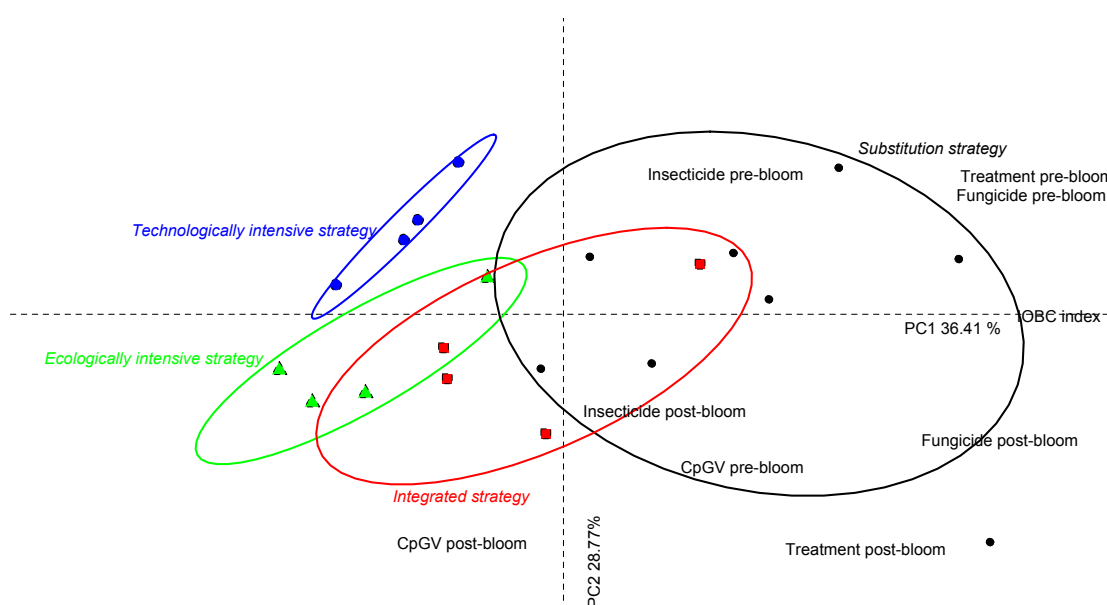


Figure 19. Projections of each farm on the first and second axis of the PCA. Each crop protection strategy is shown by a variance ellipse (67%). Pesticide usage and toxicity index are projected on the first and second axis of the PCA.

The first axis was characterized by the number of pesticide applications (i.e., number of pre- and post-bloom fungicide applications, number of pre-bloom pesticide applications, number of pre-bloom CpGV insecticide applications) and the IOBC toxicity index with increasing values from left to right. According to the position of the crop protection strategy on this axis, a lower number of pesticide was applied in the farms belonging to the “Ecologically intensive strategy” and the “Technological intensive strategy” and thus these had a lower IOBC toxicity index than the farmers of the “Substitution strategy”, the “Integrated strategy” which were in an intermediate position (Fig. 19). The “Substitution strategy” was characterized by higher variability (and thus a large ellipse). The IOBC toxicity index was linked to pesticide choice. Farmers choose insecticides based on their toxicity towards natural enemies but also by taking into account the efficiency against the targeted pests and/or user safety (Hubbell and Carlson 1998). Thus, pesticide choice can reduce the impacts on natural enemies, as shown by IPM compared to conventional strategies (Suckling et al. 1999).

Previous studies reported that differences in crop management results in differences in pesticide application number in wheat crops (Bürger et al. 2012) or in peach orchards (Penvern et al. 2010). In our study, some practices such as net exclusion and resistant cultivar planting led to reduced pesticide usage, as previously reported for resistant cultivar use in annual crops by Bürger et al. (2012) and in apple orchards by Simon et al. (2011).

The second axis clearly separated the two strategies with the least pesticide use (“Ecological intensive strategy” and “Technological intensive strategy”) and was characterized by the number of post-bloom CpGV and the number of post-bloom pesticide applications. The use of Altcarpo nets may have led to the decreased need for pesticides targeting codling moth and thus those applied after bloom.

3.4. Links between crop protection strategies, pest infestation and natural enemies

During the period of rosy apple aphid and codling moth activity, 7157 arthropods were collected. Earwigs and spiders were the most abundant groups, representing 81.46% and 15.31% of the total arthropods, respectively. The other natural enemy groups were found in lower percentages: 5.42% for the Miridae

(Hemiptera) predators, 2.12% for Coccinellidae and 0.5% for Chrysopidae. Pest infestation varied greatly among orchards, ranging from 0 to 56 % of trees infested by rosy apple aphid and from 0 to 1.62 codling moth larvae per tree (Table 5). Furthermore, when pests were more abundant, natural enemy populations were more diverse/richer but not more abundant, as previously described by Crowder and Jabbour (2014). Indeed, prey diversity (here rosy apple aphid and codling moth) can lead to the presence of natural enemies with different diet preferences, different localisation in the habitats, as well as different times of activity during the day. However, their abundance does not increase in the presence of pests due to intra-guild predation.

Index	Organic crop protection strategy									
	Ecologically intensive				Integrated		Substitution		Technologically intensive	
	Mean	Range			Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range
Pest	Codling moth infestation (larvae per tree)	0.81	0.24 - 1.42		1.60	1.57 - 1.62	0.60	0 - 1.39	0.04	0 - 0.07
	Rosy apple aphid infestation (% tree infested)	34.96	18.01 - 54.95		51.97		17.13		0.71	0 - 1.43
Natural enemies								0.71 - 21.84		0 - 0.47
	Abundance	4.03	1.22 - 6.53		1.1	0.95 - 1.25	2.88	0.14 - 7.51	2.98	0.56 - 5.41
	Shannon Diversity Index (H)	0.94	0.68 - 1.18		1.74	1.68 - 1.81	0.93	0.38 - 1.54	0.68	0.41 - 0.95
	Evenness index (E)	0.45	0.38 - 0.54		0.81	0.81 - 0.82	0.51	0.21 - 0.83	0.36	0.23 - 0.48
	Richness OTU index	8	6.0 - 7.0		8.5	8.0 - 9.0	8.4	5.0 - 8.0	6.5	6.0 - 7.0

Table 5. Characteristics of the main natural enemy communities and pest infestations depending on the crop protection strategy defined in apple orchards in the South-East of France.

A between-class analysis was used to examine orchard variability in terms of pest infestations and natural enemy communities. The two first axes of the between-class analysis explained 89.88% of the inertia (69.88 % and 28.00% respectively). The permutation test (randtest) indicated a significant difference between the crop protection strategies (p-value=0.01) (Fig. 20 and Table 5).

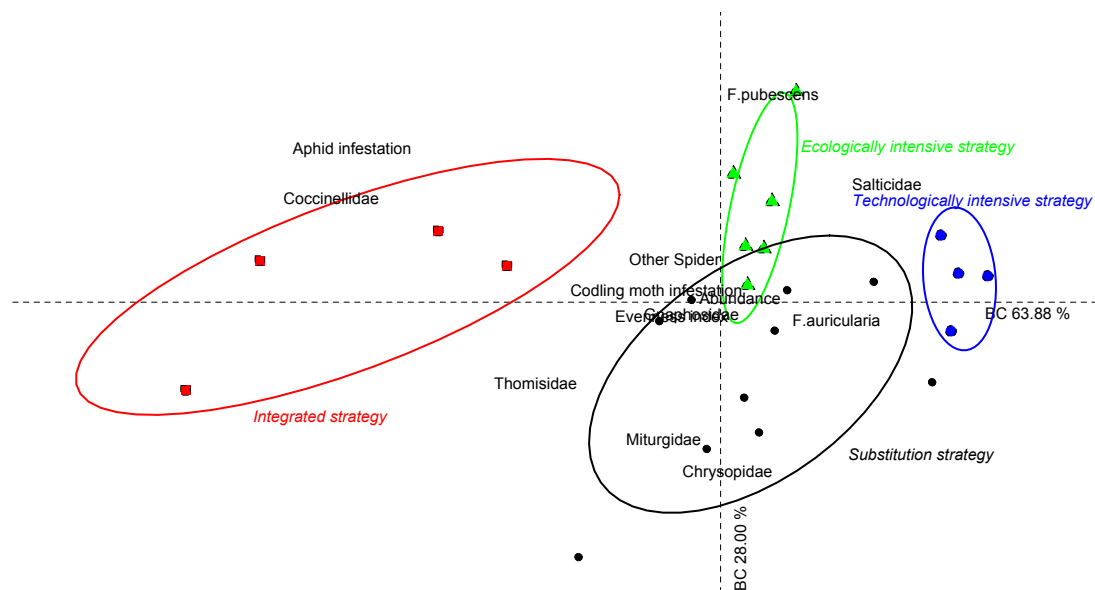


Figure 20. Projections of each farm on the first and second axis of the between-class analysis. Each crop protection strategy is indicated by a variance ellipse (67%). The index of the natural enemy community is projected on the first and second axis of the between-class analysis.

The first axis of the between-class analysis was mainly characterized by pest infestation (especially rosy apple aphid), and Coccinellidae, Thomisidae and Gnaphosidae abundance at the right side of the axis and by *F. auricularia* and Salticidae abundance on the other side. The « Integrated strategy », « Substitution strategy » and « Technologically intensive strategy » were organized along this axis.

The presence of pests affected the presence of some predators: the presence of aphids tended to increase Coccinellidae abundance. Indeed, female ladybirds prefer to lay eggs on aphid-infested trees where their larvae perform best (Rana et al. 2002), which can explain the increase in Coccinellidae abundance with increasing aphid density (Piñol et al. 2009). However, Coccinellidae are not always able to control aphid populations (low prey consumption rates, late presence) (Dib et al. 2010b).

Despite a large number of pesticide applications applied in both situations, the « Integrated strategy » differed from the « Substitution strategy » due to the abundance of Thomisidae and Gnaphosidae. This can be explained by the presence of prey in the “Integrated strategy”. Indeed Marko et al. (2009) showed that spider populations were affected in the short-term by direct toxicity from pesticides and prey availability regulated their recolonisation of the apple orchard. Other predators such as *F. auricularia* were not correlated with the presence of pests which may suggest that these predators are able to control the aphid population. This is in agreement with previous studies (Romeu-Dalmau et al. 2012) which showed that the presence of *F. auricularia* can limit aphid populations due to their earlier presence and their aphid consumption rate compared to *F. pubescens* (here projected on the second axis) (Romeu-Dalmau et al. 2012).

The « Ecologically intensive strategy » and « Substitution strategy », segregated by the first axis for pesticide application, did not differ in terms of infestation. This suggests that the effectiveness of natural enemies in controlling pests in the « Ecologically intensive strategy » may be as efficient as pesticides in the « Substitution strategy » (Crowder and Jabbour 2014). These two strategies also showed similarities in the composition of their natural enemy community. This can be related to orchard characteristics: (i) it is a perennial habitat which enhances the stability of the system and its resilience (Simon et al. 2010); (ii) it is a multi-strata habitat, the diversity of plant/pest resources in the ground cover provides resources, shelter and habitat for natural enemies (Landis et al. 2000) and intra-guild predation

decreases in complex structures (Finke and Denno 2003); (iii) adjacent plant management via hedgerows provides habitat, resources, and a refuge for natural enemies when pesticides are applied in the orchard (Rieux et al. 1999).

However, these two strategies did show some differences in terms of natural enemy communities. The second axis of the between-class analysis characterized by the abundance of *F. pubescens* on the top and by Miturgidae and Chrysopidae abundance at the bottom, segregated the « Ecologically intensive strategy » from the « Substitution strategy ». *F. pubescens* may be a bioindicator of orchards with few pesticide applications whereas the pesticides used did not appear to have a significant effect on Miturgidae and Chrysopidae. Indeed Miturgidae and Chrysopidae are known to develop tolerance to pesticides (Mansour 1984; Theiling and Croft 1988).

4. Conclusion

Our study showed that within organic farms and at the regional level, four crop protection strategies coexist that differ not only in pesticide usage but also in the combination and priority given to protection methods. Farmers using an “Ecologically intensive strategy”, driven by their objective to reduce environmental impacts, implemented consistent practices to promote biological control by natural enemies. Farmers using an “Integrated strategy” used a wide range of practices. Farmers using a “Substitution strategy” choose a cautious crop protection strategy, applying organic certified pesticide to manage pests. Farmers using a “Technologically intensive strategy” adopted innovative and technological methods. These crop protection strategies displayed different pesticide application patterns and IOBC toxicity indices. A reduction in pesticide use was observed with the use of a resistant cultivar and Alt’Carpo exclusion nets. These crop protection strategies affect natural enemy communities, even if two other factors also influence this community: (i) pest infestation which attracts « specialist » predators (i.e., Coccinellidae) and/or favors the emigration of spiders and (ii) pesticide applications which select predators according to their susceptibility. In future studies, it would be important to consider organic systems not as a unique system but a combination of different practices. The classical dichotomy of conventional versus organic agriculture must be revisited in the light of these results. Further studies will explore the impact of this “new classification” on ecosystem services.

Acknowledgments

The authors wish to thank local institutions (Chamber of Agriculture, and advice organizations) for giving their time, and farmers who took part in the survey. We also thank Jean-François Toubon for facilitating contact with growers of organic apples. The PhD fellowship of the first author was jointly financed by the DynRurABio program and the Smach metaprogram.

Chapitre 2a

**Les stratégies de protection au sein de
l'agriculture biologique influencent les
communautés d'ennemis naturels et la
prédation des œufs de carpocapse**

Chapitre 2a : Les stratégies de protection au sein de l'agriculture biologique influencent les communautés d'ennemis naturels et la prédation des œufs de carpocapse.

Dans le chapitre précédent, nous avons montré qu'au sein de l'agriculture biologique, coexistaient différentes stratégies de protection. Parmi celles-ci, deux stratégies conduisent à une diminution significative des traitements phytosanitaires : une stratégie caractérisée par l'adoption du cahier des charges Biodynamie et une par l'adoption des filets Alt'Carpo. Nous avons en outre démontré que les communautés d'ennemis naturels présentes étaient différentes selon ces stratégies. Cependant, cela ne nous renseigne pas sur le service que peuvent rendre ces communautés dans le verger. En effet, comme nous l'avons mentionné en introduction, le lien entre communauté d'ennemis naturels et le service rendu n'est pas univoque (Straub et al. 2008).

Dans ce chapitre, nous avons voulu estimer une fonction de prédation, celle s'exerçant sur les œufs de carpocapse qui est un des stades les plus nuisibles de ce ravageur. Il est important de limiter le nombre d'œufs dans le verger afin d'éviter que la larve pénètre dans le fruit et le rende non commercialisable. Monteiro et al. (2013), utilisant une méthode similaire, avaient déjà estimé le taux de prédation des œufs de carpocapse au sein de vergers de pommiers en agriculture conventionnelle, en production intégrée et en AB. Deux points peuvent être soulignés dans cette étude :

- le taux de prédation augmente entre le mois de juin et le mois d'août passant de 21,2% à 61,3 % en AB (augmentation aussi observée en agriculture conventionnelle où le taux est plus faible qu'en AB : 4,9% en juin et 36% en août) ;
- le taux de prédation varie grandement entre vergers conduits en AB: de 15% à 50% en juin et de 40% à 65% en août.

Ces auteurs ont supposé que cette variation au sein de l'AB était due aux pratiques mises en place et notamment l'utilisation du spinosad. Ce pesticide peut entraîner une diminution de la communauté d'ennemis naturels, ce qui se répercuterait sur la prédation des œufs. Cependant dans cette étude, aucun suivi de la faune auxiliaire

n'avait été réalisé et donc le lien entre ennemis naturels présents dans l'arbre et la prédation des œufs n'avait pas pu être étudié.

En se basant sur ces observations nous avons voulu approfondir certains points et tester les hypothèses suivantes :

- (i) Les communautés d'ennemis naturels sont différentes selon les trois stratégies de protection définies précédemment ;
- (ii) La fonction de prédation rendue par ces ennemis naturels varie elle aussi selon les trois stratégies de protection et également au cours de la saison ;
- (iii) Il existe un lien corrélatif entre les communautés d'ennemis naturels et la prédation des œufs.

Crop protection strategies within organic apple orchards influence natural enemy communities and predation of codling moth eggs

Marliac Gaëlle^{a*}, Penvern Servane^b, Lescourret Françoise^a, Capowiez Yvan^a.

Soumis à Biological control

^a INRA, UR1115 Plantes et Systèmes de culture Horticoles, Domaine St. Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 09 France

^b INRA, Unité Ecodéveloppement, Domaine St. Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon, Cedex 09, France

Marliac Gaëlle: gaelle.marliac@avignon.inra.fr

Penvern Servane: servane.penvern@avignon.inra.fr

Lescourret Françoise: francoise.lescourret@avignon.inra.fr

Capowiez Yvan: capowiez@avignon.inra.fr

Corresponding author:

Marliac Gaëlle

INRA, UR1115 Plantes et Systèmes de culture Horticoles, Domaine St. Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 09 France

+33 4 32 72 22 88

gaelle.marliac@avignon.inra.fr

Highlights:

- We defined a gradient of pesticide use within organic apple farms (OF).
- Natural enemy communities varied depending on organic management strategies.
- Predation of codling moth eggs varied depending on organic management strategies.
- Predation of codling moth eggs increased throughout the year and peaked in August.
- *F. auricularia* and Miturgidae abundances were positively correlated with predation.

Abstract:

Biological control is one of the key ecosystem services in organic agriculture. However the crop protection strategies used in organic agriculture can vary significantly and can affect natural enemy communities and in turn pest control. Twenty organic apple orchards were chosen and categorized according to their crop protection strategy: biodynamic, Alt'carpo netting (use of physical protection against codling moth), and the classic organic strategy. Predation of codling moth, the major pest in apple orchards, was estimated using sentinel eggs at three dates (in May, June and August) and correlated with the abundance and diversity of natural enemies monitored at the same date (in each organic orchard). We confirmed that the three crop protection strategies were characterized by significant differences regarding pesticide use. The natural enemy communities were different but variable among the three crop protection strategies. The abundance of the two earwig species (i.e., *F. auricularia* and *F. pubescens*) was higher in the biodynamic strategy while Aranae communities were not influenced by the crop protection strategy (except for Salticidae). The predation rate increased from 14.1 to 45 % from May to August. The predation rate was significantly different between the organic crop protection strategies and date with increased predation observed under Alt'Carpso netting in May and in the Biodynamic strategy in July and August. Using generalized linear models, we further demonstrated that the abundances of the spider *Cheiracanthium mildei* (Miturgidae) and the earwig *F. auricularia* were significantly correlated to egg predation, suggesting that these were the most efficient predators of codling moth eggs in the apple orchards.

Key words: Biological control, Biodiversity, ecosystem service, *Forficula auricularia*, *Cheiracanthium mildei*.

1. Introduction

Organic agriculture promotes ecosystem services and in particular pest control by natural enemies (Crowder et al. 2010; Sandhu et al. 2010). This is presumed to be achieved by promoting increased biodiversity and specifically increased biodiversity of natural enemies (Letourneau et al. 2009). While positive links between organic agriculture and natural enemy abundance and/or diversity have often been reported, this was not always the case (little or no difference between the systems, or sometimes in favor of the conventional system) and it appears to be variable depending on the species considered (Bengtsson et al. 2005; Garratt et al. 2011; Hole et al. 2005; Winqvist et al. 2011). To investigate this link, most studies compared organic and conventional farming and thus assumed that both farming systems are quite homogenous. However, Hole et al. (2005) suggested that the benefits to biodiversity from organic agriculture are likely to stem primarily from prohibition of synthetic chemicals but also from the adoption of various other management practices (cultural practices, ground cover management, presence of hedgerows). Organic management strategies are thus defined by a combination of different practices (Zehnder et al. 2007) that can have a different effect on the species and thus the composition of the community (Hole et al. 2005; Simon et al. 2007). Up to now, this variability within organic management has been rarely studied.

The link between natural enemy diversity and pest control is unclear, different studies showed a positive, negative or neutral effect between predator diversity and pest control (Finke and Snyder 2010; Letourneau et al. 2009; Straub et al. 2008). The relationship between natural enemy diversity and pest control is strongly dependent on the predator species composing the community and their interactions (i.e., intraguild competition, resource competition) (Straub et al. 2008). Most studies focusing on this relationship were conducted in control or semi-field experiments and manipulated predator diversity (to one predator from 3-4 predators) (Finke and Snyder 2010). Little is known about the relationship between pest control and the whole natural enemy community present in commercial fields and how this relationship is affected by management strategies (Chang and Snyder 2004).

The main pest in apple orchards is the codling moth. In South-East France, this Lepidopeteran pest has two or three larval generations and is targeted by 12 insecticide applications on average (Sauphanor et al. 2009). In South-Eastern France, an innovative technique (i.e Alt'Carpo net) has increasingly been used since 2005 for controlling populations of codling moth (Sauphanor et al. 2012). It provides a physical protection and prevents pest colonization and reproduction permitting significant decreases in pesticide use (Sauphanor et al. 2012). The egg stage is the most crucial for biocontrol to avoid damage caused to the fruit by the larvae. Both egg predation and egg parasitism (smallest proportion for the latter, (Monteiro et al. 2013)) may contribute to this early-stage biological control. The guild of generalist predators effective against Lepidoptera eggs and present in apple trees at the same time as codling moth is known: earwigs (*Forficula spp.*) (Glen 1977), spiders (Araneae) (Glen 1977; Pearce et al. 2004), ladybirds (Coccinellidae) (Chang and Snyder 2004; Evans 2009; Glen 1977) and true bugs (Miridae) (Glen 1977). Aphids are prey that can be shared by these predators and particularly the rosy apple aphid (Dib et al. 2011; Dib et al. 2010b).

In this study we wanted to examine the relationships between organic management and the abundance of generalist predators and between this community and the level of pest control under natural conditions. For this, we used a set of organically farmed commercial orchards with various protection strategies. In an “a priori” approach, we defined three crop protection strategies among these organic commercial orchards to address the following questions. Does this “a priori” variability within the organic crop protection strategies result in significant differences in pesticide use and other management practices (i.e ground cover management and the presence of hedgerows)? Since generalist predators might be influenced differently by the management system, do the three organic crop protection strategies host different communities of natural enemies in terms of abundance and diversity? Finally, do these possible differences result in differences for predation of codling moth eggs and if so then what are the most probable predators that fulfilled this service?

2. Material and Methods

2.1. Study orchards

The study was carried out in twenty organic apple orchards in a 20 km diameter circular region around Avignon (South-East France). Three crop protection strategies were ‘a priori’ defined to represent the variability of pesticide use in South-East France. In the AltCarpo netting strategy the trees are enclosed with a mesh net. It provides a physical barrier and prevents codling moth colonization and reproduction and significantly decreases pesticide use (Sauphanor et al. 2012). The biodynamic strategy is defined by the guidelines of biodynamic principles (here Demeter® guideline), while it shares much in common with organic methods (ground cover management, hedgerow), it preferentially uses special preparation (biodynamics preparation) and limits organic pesticide use. It is rarely distinguished from other organic systems (Pfiffner and Niggli, 1996). In this cropping system, farmers used *Cydia pomonella* granulovirus and mating disruption for protection against codling moth and did not use Alt’Carpo nets (presumably since these nets are plastic which is not a natural material). The last strategy, composed of farms which did not follow biodynamic guidelines or use netting, is thus the “classic organic strategy” (RCE 889/2008), mainly based on the use of Spinosad®, *Cydia pomonella* granulovirus and mating disruption to control codling moth.

The Frequency Treatment Index (TFI) was calculated from treatment calendars. TFI is a simple indicator used to monitor pesticide use in European agriculture (Butault et al., 2011). This index corresponds to the number of full registration doses of the commercial product applied during the season (Jørgensen 1999). The TFI indicator was calculated including all pesticides (Total TFI), fungicides (fungicide TFI), microbial insecticides, mainly *Cydia pomonella* granulovirus and *Bacillus thuringiensis*, (microbial insecticide TFI), and other insecticides, Spinosad®, Mineral oil, Pyrevert® (insecticide TFI). No herbicides are applied in organic farms.

Two other management practices, which may influence the natural enemy communities, were also considered in this study: the ground cover and the presence of hedgerows. The inter-rows of all organic orchards present a natural ground cover, the height was variable among the orchard and the season. We calculated the mean height

of ground cover in orchard alleys during the study (three measures with one at each sampling date). The orchards around Avignon are characterized by the presence of a very dense network of windbreak hedgerows to protect them against the prevailing northern winds. We thus computed a synthetic indicator that merged the quantity of hedgerow and its quality in terms of floral biodiversity: $HQ = \sum(a_i * l_i) / \sum(l_i)$ with l_i the length of each orchard border and $a_i=0$ in the absence of hedgerow, $a_i=1$ for a hedgerow with a very low plant biodiversity (typically pure *Cypressus* hedgerow) and $a_i=2$ for a hedgerow with a higher plant biodiversity (i.e. the dominant plant representing than 80% of the plants).

2.2. Estimation of codling moth egg predation

We used eggs of a susceptible laboratory strain of *C. pomonella* reared on an artificial diet (INRA, Avignon, France) to assess egg predation within these twenty orchards. Egg laying sheets (30 cm × 30 cm) were placed in the rearing cages at dusk and females were allowed to lay eggs for 12 h. The following morning, the eggs were sterilized by placing the egg-laying sheet under a UV lamp (20W) for 20s (Monteiro et al., 2013). The sheet was cut into cards containing an average of 8.83 (\pm SD 1.73) eggs. Thirty cards were spaced individually in the middle of each orchard. Each card was stapled onto the lower side of a leaf at the outside of the canopy at head height. After 2.5 days-exposure to natural enemies, the cards were removed and the predation rate was assessed. Cards were exposed at three dates, May 15th, July 15th and August 15th, 2012, i.e. during the first, second and third *C. pomonella* annual generation, respectively.

2.3. Monitoring natural enemies

The abundance of natural enemies in the tree canopy was estimated in each orchard at the same three sampling dates. In each orchard, at each date, thirty corrugated cardboard band traps were wrapped around a branch, on the same tree where the predation rate was estimated. The traps were placed one week before the exposure of sentinel eggs and removed one week after the exposure. To avoid

possible interactions between the trap and the sentinel eggs on the same tree, they were not placed on the same branches.

To remove the traps they were individually closed in a plastic bag and only opened under laboratory conditions. The arthropods found in each trap were stored in 70% ethanol for further identification. According to their relative abundance, we defined different OTU (Observable Taxonomic Units) as earwig populations described at the species level (Dermaptera: *Forficula auricularia* and *F. pubescens*), spiders at the family level (Araneae, mainly Salticidae, Gnaphosidae, Miturgidae, Thomisidae), while Coccinellidae (Coleoptera, mainly *Adalia bipunctata* L. and *Harmonia axyridis* P.), predatory Miridae (Hemiptera, mainly *Pilophorus spp.* and *Deraeocoris spp.*) and Chrysopidae (Neuroptera, *Chrysoperla spp.* and *Hemerobius spp.*) were grouped at the order level.

2.4. Statistical analysis

For TFI, the homogeneity of variance and normality was verified using Bartlett's and Shapiro-Wilk tests, respectively. We determined whether the organic crop protection strategy (biodynamic, Alt'Carpo netting and classic organic strategy) influenced the TFI for different kind of pesticides (i.e., Total TFI, TFI fungicide, TFI microbial insecticide, TFI insecticide) using a one-way ANOVA followed by post-hoc comparisons (Tukey HSD) when normality and homoscedasticity were met. Otherwise a Kruskal-Wallis followed by post-hoc comparison tests were performed. The significance level was set to 5%.

To determine whether the organic crop protection strategy (biodynamic, Alt'Carpo netting and classic organic strategy) influenced egg predation or the abundance of generalist predators, we applied a generalized linear model (GLM) at each date with, respectively, a Binomial error distribution with logit link function and a quasi-poisson error distribution. A multiple post-hoc test (Tukey test) was performed to detect any significant difference between the crop protection strategies.

To determine if the whole natural enemy community was different depending on the organic crop protection strategy, we performed a Principal Component

Analysis (PCA) on natural enemy abundance after a Hellinger transformation (Legendre and Gallagher 2001). This was followed by a between-class analysis and a randomization procedure with 99 permutations to test the significance of the groups of organic crop protection strategy on the natural enemy community. For visualization, we drew ellipses for each group on the PCA projection plane defined by the two first axes.

To determine which predator species was significantly correlated with egg predation, at the season scale, a generalized linear model (GLM) was used with a Binomial error distribution and a logit link function. An information-theoretic approach including all the candidate models (based on the fit of all possible variable combinations) was used. The best model was selected using Akaike information criterion (AIC) (Zuur et al. 2009). For all GLM procedures, a level of 1% was chosen to test the significant difference of the model parameters (Zuur et al. 2009).

PCA and between-class analysis were performed with the ADE4 package (Chessel et al., 2004), generalized linear models with the lme4 package (Bates et al. 2014), information-theoretic approach with the MuMin package (Bartoń 2013), and multiple comparisons with the multcomp package (Hothorn et al. 2008) all from R 2.14.1 software (R Development Core Team, 2010).

3. Results

3.1. Pesticide use differs in the three organic crop protection strategies

The pesticide use of the three crop protection strategies (biodynamic, Alt'carpo netting, classic organic strategy) was different (Fig. 21). The insecticide TFI was higher in the classic organic strategy (5.9 ± 1.51) than the biodynamic strategy (2.7 ± 0.83) ($F=6.489$; $df=2$; $P=0.04$). The microbial insecticide TFI was higher in the biodynamic (17.1 ± 1.67) and classical strategies (12.65 ± 3.33) than Alt'Carpo netting strategy (7.14 ± 4.45) ($F=12.19$; $df=2$; $P<0.001$).

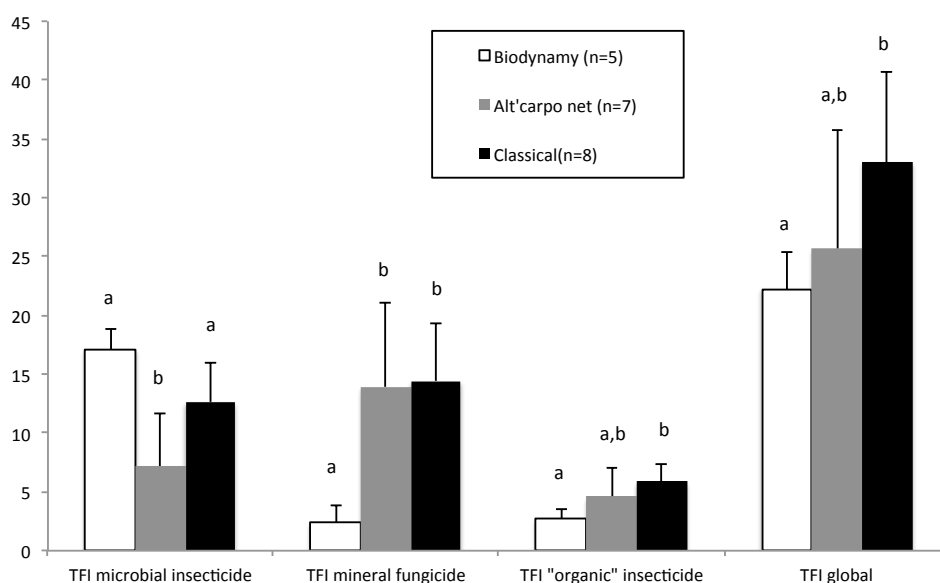


Figure 21. Annual mean values (and standard deviation) for the treatment frequency indices (TFI) of each organic crop protection strategy, for different categories of pesticides used.

The fungicide TFI was higher in the classic (14.44 ± 4.95) and Alt'Carpo netting strategies (13.93 ± 7.09) than in the biodynamic strategy (2.4 ± 1.52) ($F=9.727$; $df=2$; $P=0.008$).

The mean height of the ground cover during the season was higher in the biodynamic strategy (40.53 ± 3.97 cm) than in the Alt'Carpo netting (19.57 ± 6.87 cm) and classic strategies (21.11 ± 9.29 cm) ($F=7.708$; $df=2$; $P=0.02$). The hedgerow quality index was not significantly different between the three crop protection strategies ($F=3.182$; $df=2$; $p=0.067$).

3.2. Effect of the organic crop protection strategy on the natural enemy communities

A total of 6,735 natural enemies were caught for the three sampling dates. Earwigs and spiders were the most abundant OTU, representing 83.59 % and 10.08% of the total arthropods, respectively. The other natural enemy OTU were found in lower percentages: 2.87% for Coccinellidae, 2.70% for the predatory Miridae (Hemiptera) and 0.77% for Neuroptera. Two species of earwigs were found in the

apple orchards: *F. auricularia* (82.77% of the earwigs) and *F. pubescens* (17.23%). The community of spiders consisted of Salticidae (39.62% of the Araneae community), Gnaphosidae (35.77%), Miturgidae (only one species: *Cheiracanthium mildei*, 10.31%), Thomisidae (7.22%), Philodromidae (3.82%) and Clubionidae (3.24%) (Tab. 6).

The first two axes of the PCA of the natural enemy community in the twenty orchards explained 35.45 % of the total inertia (Fig 22). The natural enemy community was significantly different depending on the organic crop protection strategy ($p=0.008$, Between-class analysis). Although the three groups greatly overlapped, their barycentres were ordered on the first axis of the PCA in the following order: biodynamic, Alt'carpo netting and classic organic strategy. The first axis was built by the opposition between Salticidae, *F. auricularia*, *F. Pubescens* on the negative side of the axis and Miturgidae and Thomisidae abundance on the positive side.

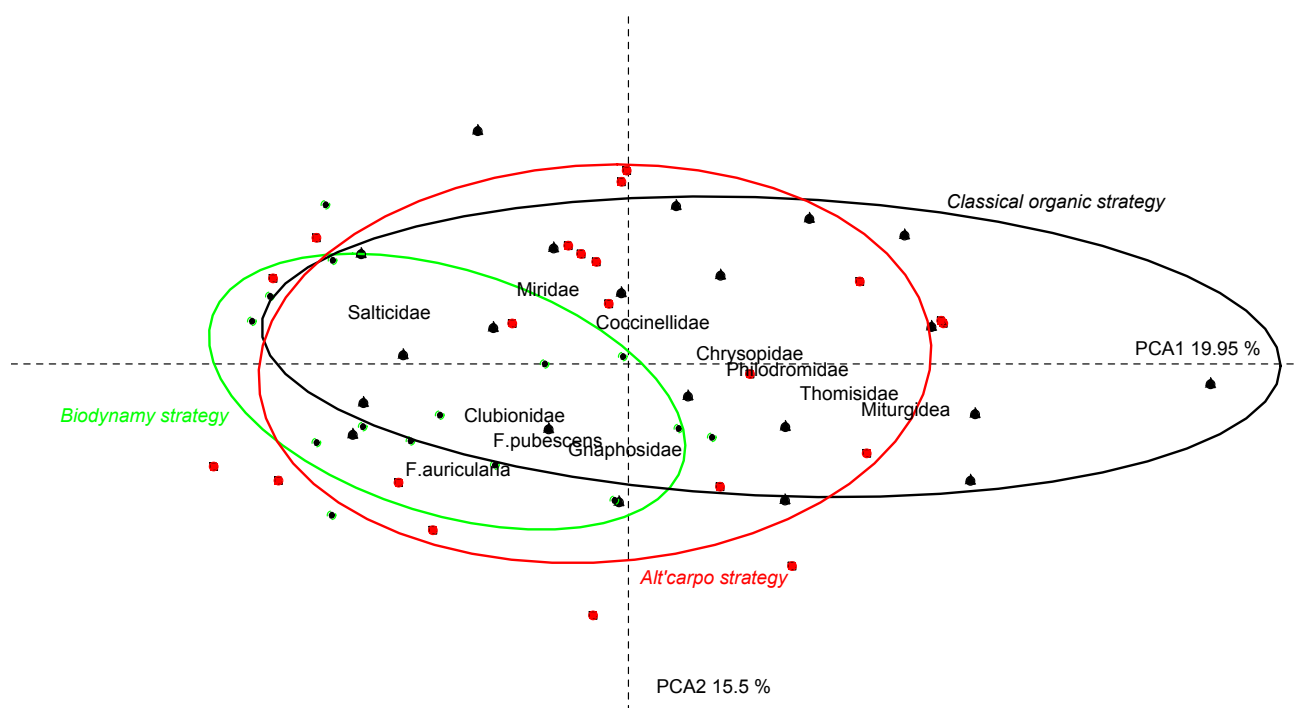


Figure 22. PCA plot of natural enemy community showing the 67% confidence interval ellipse for organic crop protection strategy and the practice affecting the community. Each point represent an orchard.

		Dermaptera		Araneae						Coccinellidae	Heteroptera	Chrysopidae
		F. auricularia	F. pubescens	Salticidae	Gnaphosidae	Miturgidae	Thomisidae	Philodromidae	Clubionidae		Miridae	
Season	Biodynamic	4.44 (a)	1.94 (a)	0.25 (a)	0.15	0.03	0.03	0.01	0.02	0.06	0.04 (b)	0.01
	Alt'carpo neting	4.65 (a)	0.06 (c)	0.21 (a)	0.12	0.05	0.03	0.03	0.02	0.10	0.19 (a)	0.02
	Classic	1.13 (b)	0.38 (b)	0.10 (b)	0.19	0.05	0.02	0.01	0.01	0.18	0.11 (ab)	0.06
May	Biodynamic	1.05 (b)	0.83 (a)	0.46	0.06	0	0.01	0	0.01	0.07 (b)	0.06	0
	Alt'carpo neting	5.79 (a)	0.10 (b)	0.24	0.09	0.01	0.02	0.01	0.05	0.09 (b)	0.33	0.01
	Classic	1.25 (b)	0.83 (a)	0.23	0.14	0.03	0.01	0	0.01	0.36 (a)	0.14	0.02
July	Biodynamic	6.35 (a)	2.64 (a)	0.17 (a)	0.20	0.02	0.07	0.01	0.03	0.01	0.05	0.02
	Alt'carpo neting	4.46 (a)	0.07 (b)	0.10 (ab)	0.07	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.23	0.04
	Classic	1.79 (b)	0.28 (b)	0.03 (b)	0.19	0.08	0.03	0.01	0.01	0.03	0.16	0.09
August	Biodynamic	5.96 (a)	2.34	0.11 (ab)	0.19	0.06	0.03	0.02	0.01	0.12	0	0
	Alt'carpo neting	3.53 (a)	0.01	0.30 (a)	0.23	0.12	0.06	0.05	0	0.22	0	0.02
	Classic	0.21 (b)	0.01	0.05 (b)	0.26	0.04	0.04	0.04	0	0.18	0	0.06

Table 6. Mean abundance of the main natural enemies per trap in the three organic crop protection strategies according to the season and the three sampling dates (i.e., May, July, August).

In terms of abundance per trap, all the OTU of predators were found in the three strategies. The abundance of some predators was not different among the different strategies at the seasonal scale (i.e., Mitugidea, Clubionidae, Gnaphosidea, Thomisidae, Phylodromidae and Coccinellidae, Neuroptera) (Tab. 6). *F. auricularia* abundance was significantly higher in Alt'carpo netting and biodynamic than in the classical strategy ($P<0.001$). *F. pubescens* abundance was significantly higher in the biodynamic than in the classical, then in the Alt'Carpo netting strategy ($P<0.001$). Salticidae abundance was significantly higher in biodynamic orchards and under Alt'carpo netting than in classic orchards ($P<0.001$). Miridae was significantly higher in the Alt'carpo netting strategy than the biodynamic strategy ($P=0.002$).

Date per date: no significant differences between the crop protection strategies were observed for the Araneae community (except for Salticidae in July and August), Neuroptera, and Miridae. *F. auricularia* abundance was significantly higher under Alt'carpo netting in May and in the Alt'carpo and biodynamic compared to the classic strategy ($P<0.001$) in July and August. *F. pubescens* abundance was significantly higher in biodynamic and classic orchards in May and only higher under biodynamic guidelines in July ($P<0.001$). No differences were observed in August.

3.3. Predation of codling moth eggs

3.3.1. Predation rate

Total predation rates increased significantly throughout the year with on average 14.1% in May, 26.2% in July and 45% in August ($P<0.0001$). We also detected a significant effect of the crop protection strategy on predation rates. In May, when the predation rate was low, the highest value of predation ($20\% \pm 11\%$) ($P<0.0001$) was found for the Alt'carpo netting strategy.

In July, a marginally significant highest value of predation was observed for the biodynamic strategy ($30\% \pm 6\%$) compared to the classic ($24\% \pm 10\%$) and Alt'Carpo strategies ($26\% \pm 8\%$) ($P=0.013$). In August, when the overall predation rate was the highest, predation values were the highest in the biodynamic strategy ($58\% \pm 20\%$) ($P<0.0001$) (Fig 23).

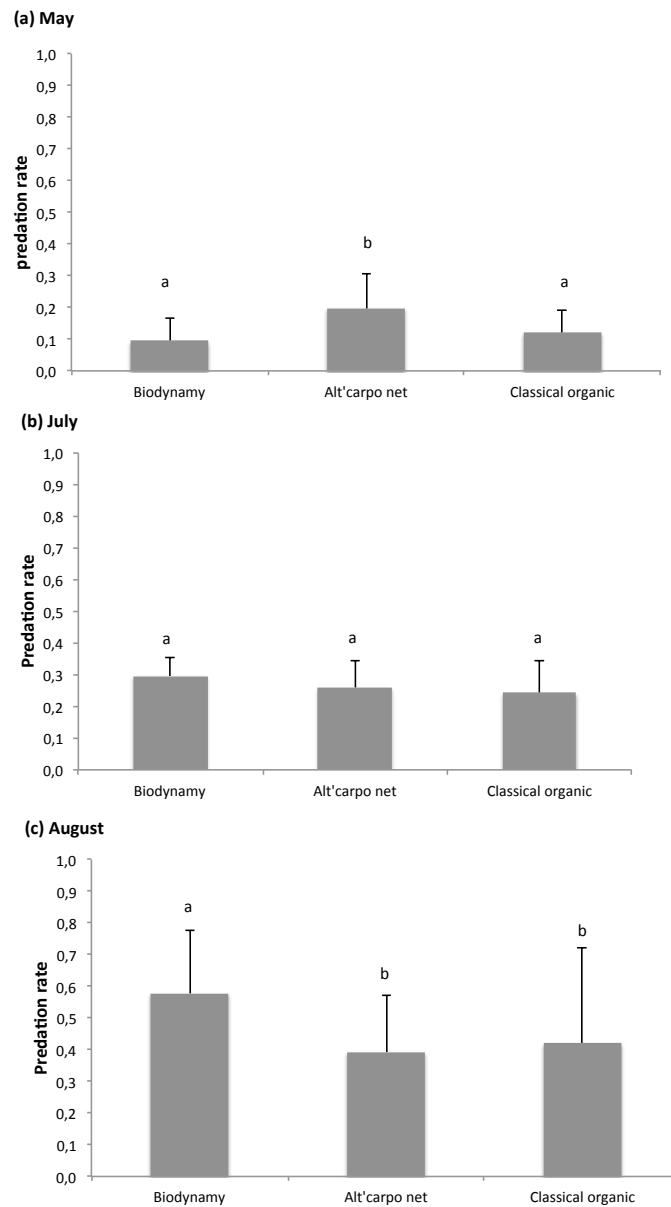


Figure 23. Predation rate according the organic crop protection strategy in May (a), July (b), August (c).

3.3.2. *Linking natural enemy abundance to predation rates*

The best model selected by the information-theoretic approach is presented in Table 7 and retained seven natural enemies. Among these, Miturgidae and *F. auricularia* had a significant positive effect on the total predation rate while Salticidae and Miridae had a significant negative effect on total predation rate.

	Value \pm SE	z value	
Miturgidae	0.50 \pm 0.08	5.97	***
Salticidae	-0.12 \pm 0.04	-3.29	**
F.auricularia	0.16 \pm 0.02	8.37	***
F.pubescens	-0.07 \pm 0.04	-1.81	ns
Coccinellidae	-0.06 \pm 0.04	-1.72	ns
Chrysopidae	-0.20 \pm 0.11	-1.86	ns
Miridae	-0.17 \pm 0.05	-3.82	***

Table 7. Best model selected using the Akaike information criterion from linear mixed effect models linking total predation rate and natural enemies abundance. Natural enemies with significant effects on predation rate was in bold.

4. Discussion

4.1. Different pesticide use within organic farming.

Different pesticide uses were observed in the three “a priori” defined organic crop protection strategies. In this study, we showed that farmers used two different crop protection strategies, besides the usual organic practices, by adopting an innovative technique (i.e Alt’Carpo netting) or a stricter guideline (Demeter® guideline). The use of Alt’Carpo nets in the Alt’Carpo netting strategy decreased the application of microbiological insecticides against codling moth, as previously shown by Sauphanor et al. (2012) The biodynamic strategy used significantly less fungicide presumably in order to limit the direct impact on natural enemies. The classic organic strategy could thus be considered the most intensive strategy in the organic apple orchards studied, as far as pesticide use is concerned. A gradient of intensity in pesticide can thus be defined increasing from biodynamic, to Alt’Carpo netting and then to the classic organic strategy. The ground cover was also managed differently depending on the crop protection strategy, with an increased height in the biodynamic orchard due to less frequent mowing. These two observations (differences in the TFI and mowing frequency) are consistent with the suggestion by Hole et al. (2005) that organic farming is variable concerning several agricultural practices. We conclude that organic systems cannot be considered as a unique and homogeneous mode of production (Letourneau and Bothwell 2008; Penvern et al. 2010).

4.2. Crop protection strategy and natural enemy community

The natural enemy communities sampled in the organic apple orchards in this study were different to those found previously (Brown and Schmitt 2001; Miliczky and Horton 2005; Simon et al. 2007), with a higher relative abundance of earwigs observed here. This could be explained by different sampling methods (branch beating method v.s corrugated cardboard band traps). Indeed, earwigs produce an aggregation pheromone (Sauphanor and Sureau 1993), which increases their abundance in traps (Dib et al. 2010). In our study, *F. auricularia* and *F. pubescens* were present in the same orchards and in the same traps. This result agrees with the laboratory results of Sauphanor and Sureau (1993) and the field results of Romeu-Dalmau et al. (2012) which showed that these two species can be present in the same orchards without negative interactions.

All the OTU defined were present in the three crop protection strategies. Although the TFI for the three crop protection strategies was different, we did not observe the complete disappearance of any of the OTU and thus no obvious decrease in diversity as classically observed when comparing conventional versus organic agriculture (Bengtsson et al., 2005; Hole et al., 2005).

Even though the natural enemy communities were significantly different in each organic crop protection strategy (between-class analysis, OTU abundance), high variability was observed between orchards belonging to the same strategy which resulted in overlaps between the three strategies. The TFI could explain some variation in the community due to the sensitivity of the species to the pesticides. We found that *F. auricularia* and *F. pubescens* were more abundant in the orchards under the biodynamic strategy, it is known that *F. auricularia* is sensitive to Spinosad® (an organic insecticide which is not used under biodynamic) (Cisneros et al. 2002; Shaw and Wallis 2010). Even if knowledge about *F. pubescens* is scarce, we can assume that this species is also sensitive to pesticides since its abundance was significantly higher in the biodynamic strategy. While it was reported that Miturgidae and Chrysopidae can develop some tolerance to pesticides (Mansour 1984; Theiling and Croft 1988), we did not find any differences in terms of abundance between the organic crop protection strategies.

Pesticides, however, are not the only component of crop protection strategies in organic orchards. Other practices can also influence natural enemy communities

(species composition and abundance). Ground-cover can be a reservoir of alternative prey, a shelter to natural enemies (Landis et al., 2000) and thus can affect arthropod communities (Horton et al. 2003; Paredes et al. 2013; Rieux et al. 1999). The hedgerows surrounding the orchards could also provide alternative prey and provide a shelter then a dispersal source for the recolonization of the orchard after a pesticide application. It is well known that Heteroptera, Chrysopidae, Araneae can move between the ground cover or adjacent habitat and the tree canopy (Horton et al. 2009; Miliczky and Horton 2005). In particular according to Hogg et al. (2010), Hogg and Daane (2011), *C. mildei* is adapted to agricultural disturbances due to its ability to recolonize orchards using its aerial dispersion mode. Since no significant difference in hedgerow quality was observed between the three protection strategies, this could explain the similar abundance of Araneae between the three crop protection strategies, except for Salticidae.

4.3. Natural enemy communities and codling moth egg predation

The predation rate of codling moth eggs in the organic apple orchards increased throughout the season and was the highest in August. These observations are in agreement with the observations of Monteiro et al. (2013) in apple orchards and Atanassov et al. (2003) in peach orchards. A higher predation rate in the third generation is useful as it decreases the pest inoculum in the following year, but for the growers a higher predation rate would have been more interesting in the first generation in order to limit fruit damage. A better understanding of the underlying causes for this increase in predation rate could be useful for improving pest control. Depending on the dates, two different assumptions can be made to explain this temporal increase: (i) presence of an alternative prey in May and (ii) detrimental effects of pesticides on natural enemies in June and July.

During the first generation of codling moth (i.e May), rosy apple aphids were also present in the orchards (number of rosy apple aphid colony per tree was not significantly different between the three crop protection strategy, data not show) and are an alternative prey for generalist predators such as earwigs. This could explain the low rate of consumption of the codling moth eggs at that time of year. Musser and Shelton, (2003) and Bickerton and Hamilton, (2012) previously observed a decrease

in predation of Lepidoptera eggs due to the presence of an alternative prey in corn and pepper, respectively.

Furthermore since generalist predators can also switch prey, we suggest that they switched to the second generation of codling moth eggs when rosy apple aphids were no longer available (Murdoch 1969; Symondson et al. 2002). In the dry summer conditions, fungicide applications decreased significantly, and thus their direct (toxicity) and indirect impacts (behavior modification, decrease of prey) on natural enemies was also reduced. These results highlight the importance of temporal dynamics in biological control studies (Welch and Harwood 2014) in order to define an optimal trade-off between biological control and pesticide use.

The predation rate also varied depending on the organic crop protection strategy with increased rates under Alt'Capro netting in May and in biodynamic orchards in June and July. In May, all orchards had the same degree of rosy apple aphid infestation (rosy apple aphid colony per tree) suggesting that the presence of an alternative prey cannot explain the higher predation rate in the Alt'Carpo netting strategy. Under the Alt'carpo netting strategy, microbiological insecticides were not applied against codling moth, this could limit the mechanical perturbations in the orchard and the possible toxicity against natural enemies. In addition, nets can modify the climatic conditions in the trees (less wind, higher temperatures (Capowiez et al. 2014)) and this could be favorable for the activity of some predators such as *F. auricularia* (higher abundance in Alt'Carpo netting strategy in May). In July (marginally) and August, predation rates were higher for the biodynamic strategy, this could be related to the lower fungicide application and the taller ground cover, potentially favorable to *F. auricularia* (higher abundance in the biodynamic strategy).

C. mildei and *F. auricularia* abundance was positively correlated to the codling moth egg predation rate. This result confirmed their role as predators of codling moth eggs and the adequacy of their phenology (i.e., presence of active stage) during the presence of codling moth eggs in commercial organic apple orchards (Glen 1977). Salticidae were negatively correlated with codling moth egg predation. Due to their "sit and wait" hunting mode (Cardoso et al. 2011), Salticidae are assumed to not eat static prey such as eggs. In addition, possible intraguild predation between Salticidae and other predators could have a negative impact on the predation rate (Markó and Keresztes 2014). Miridea were also negatively correlated with codling

moth egg predation while it is known that they can eat Lepidoptera eggs (Glen 1977), this could be due to a possible negative interaction between Miridea and other predators in the apple orchards (Finke and Denno, 2003). Intraguild predation could have also occurred with taxons that were not correlated with egg predation: Chrysopidae (Pérez-Guerrero et al. 2013), Coccinellidae (Lucas et al. 1998), spider (Pfannenstiel 2008).

The link between natural enemy abundance and pest control is complex, and it is important to take into account the predator identity and efficiency. According to Chang and Snyder (2004), a specific complex (i.e., a few species identified as predators of codling moth eggs in our case) is needed to maximize pest suppression services.

Acknowledgments

The authors wish to thank the farmers who allowed us to use their fields for the data collection part of the survey. We are grateful to Cecile Thomas, Alexandre Camuel, Marianne d'Azemar, Arthur Cambert for their assistances in the field and in the lab. The research leading to these results has received funding from the European Union Seventh Framework Programme (FP7/ 2007-2013) under the grant agreement n°265865. The PhD fellowship of the first author was jointly financed by the DynRurABio program and the Smach metaprogram.

Chapitre 2b

Infestation par le puceron cendré et les possibles conséquences sur la consommation des prédateurs généralistes

Chapitre 2b : Infestation par le puceron cendré et les possibles conséquences sur la consommation des prédateurs généralistes

1. Introduction

Le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea* P) est le second ravageur le plus important pour les producteurs en AB après le carpocapse des pommes (Objectifs info Arbo 2014). Dans le sud-est de la France, les colonies de puceron cendré apparaissent à partir de mi-avril et les pucerons migrent vers l'hôte secondaire, le plantain, début juin. Le pic d'infestation se situe début mai (Dib et al. 2010). A cette période (mai), sa présence coïncide avec la 1^{ère} génération de carpocapse.

Le puceron cendré et le carpocapse possèdent une guildes de prédateurs généralistes communs, parmi lesquels on peut citer : les coccinelles , les forficules , les araignées (Dib 2010). Le contrôle biologique par conservation pourrait représenter une méthode de gestion du puceron cendré. Cependant, la plupart des études concluent que la présence des prédateurs n'est pas suffisante pour réguler le puceron cendré, l'arrivée des prédateurs étant souvent trop tardive (Dib et al. 2010b). Des pesticides biologiques sont alors appliqués pour contrôler ce ravageur.

Le chapitre 2 a permis de mettre en évidence que la prédation des œufs de carpocapse était faible lorsque le puceron cendré était présent. Nous avons alors fait l'hypothèse que ce faible taux de prédation pouvait être dû à la présence du puceron cendré. Cette ressource peut, en effet, représenter une perturbation pour les prédateurs généralistes : perturbation pour la localisation de la ressource ou une préférence alimentaire. Dans ce chapitre 2b, nous répondrons à deux questions :

- (i) l'infestation puceron cendré varie-t-elle selon les vergers commerciaux AB ? ;
- (ii) quel est l'impact de l'infestation puceron cendré sur la consommation de puceron cendré et de carpocapse des prédateurs généralistes ?

Pour cela, après avoir caractérisé l'infestation par le puceron cendré dans les 20 vergers commerciaux AB du chapitre 2, nous avons réalisé des analyses de contenus stomacaux de prédateurs généralistes sur des vergers très infestés et des vergers non infestés par le puceron cendré en mai (lorsque les 2 ressources sont présentes) et en juillet et août (lorsque le puceron cendré n'est plus présent dans les vergers).

2. Matériels et méthodes

Cette étude a été menée sur les 20 parcelles commerciales en AB suivies dans le chapitre 2. Elles ont été classées selon les trois stratégies du chapitre 2 : biodynamie, Alt'carpo et classique.

2.1. *Suivi puceron cendré*

Le suivi du puceron cendré s'est déroulé du 12 avril 2012 au 5 juin 2012. Cinq relevés ont été réalisés. A chaque relevé, 30 arbres par verger ont été choisis aléatoirement en excluant les rangs de bordure. Sur chacun des arbres sélectionnés, le nombre de colonies de puceron cendré a été comptabilisé. Les colonies de puceron cendré se caractérisent par l'enroulement longitudinal des feuilles et sont facilement observables (Fig. 24). Le nombre de colonies moyen par arbre à l'échelle de la saison a été calculé.



Figure 24. Colonie de puceron cendré

2.2. *Analyse de contenus stomacaux*

Sept vergers ont été sélectionnés pour cette analyse et répondre à notre deuxième question : trois peu infestés par le puceron cendré et quatre très infestés par le puceron cendré. Dans ces vergers, des prédateurs généralistes ont été capturés par la méthode des bandes pièges, isolés et congelés individuellement à -80°C. Les prédateurs généralistes sélectionnés sont ceux identifiés comme prédateurs du puceron cendré et du carpocapse et présents en quantité suffisante dans nos vergers:

forficules, araignées (Miturgidae, Clubionidae, Gnaphosidae), punaises prédatrices (Miridae). Ces prédateurs ont été capturés à trois dates : en mai lorsque le puceron cendré et la 1^{ère} génération de carpocapse (G1) coïncide dans les vergers, en juillet et août lorsqu'il n'y a plus de puceron cendré mais respectivement la deuxième (G2) et troisième génération (G3) de carpocapse.

L'ADN a été extrait à partir de l'abdomen des prédateurs généralistes coupé en petit morceaux en utilisant le DNeasy Blood & Tissue Kit (QIAGEN, Valencia, California). Après extraction l'ADN a été re-suspendu dans 100 µL of de tampon d'élution et stocké à 4°C. Un gène du carpocapse et un gène du puceron cendré ont ensuite été amplifiés séparément par PCR. Les amorces ont été déterminées au sein du gène mitochondriale de la cytochrome oxydase I (Boreau de Roince et al., 2012). Les amplifications d'ADN ont été effectuées dans 10 µL de volume contenant 2 µL d'ADN, 2 µL de tampon Taq (Promega, Madison, Wisconsin), 0.5 µL de dNTPs, 0.4 µL de chaque amorces (les amorces forward sont étiquetées avec de la carboxyfluorescein fluorescente), 0.2 µL de Taq polymérase (Promega), 1 µL de MgCl₂, 0.1 µL de sérum d'albumine bovine (Promega), 2 µL de (NH₄)₂SO₄ et 1.4 µL d'eau. Des tubes témoins ont été utilisés pour vérifier le bon fonctionnement de la PCR (pas d'erreur et de contamination entre les tubes): trois contrôles positifs (ADN de forficules ayant mangé des oeufs de carpocapse, ayant mangé des larves de carpocapse et ayant mangé du puceron cendré) et deux négatifs (de l'eau et de l'ADN de forficule n'ayant mangé aucune des deux ressources).

Les séquences amplifiées ont été analysées avec le séquenceur d'ADN en utilisant le laser pour détecter la fluorescence des amorces.

Le pourcentage de prédateurs (i) ne consommant aucune des deux ressources, (ii) une des deux ressources (puceron cendré ou carpocapse), (iii) les deux ressources a été calculé par rapport au nombre total de prédateurs testés.

2.3. Analyse statistique

Pour tester les différences d'infestation entre les stratégies de protection, un test non paramétrique Kruskal-Wallis a été réalisé avec un seuil de significativité de 5% (conditions normalité et d'égalité des variances non vérifiées).

3. Résultats

3.1. Une infestation puceron cendré variable entre verger.

Le nombre de colonies par arbre est très variable selon les vergers (Fig 25). Certains vergers ne présentent aucune ou peu de colonies par arbre sur l'ensemble de la saison (P15, P16, P7 et P6) alors que d'autres sont très infestés : les vergers P20, P3, P14, P4 ont en moyenne respectivement 4.9, 3.05, 4.3, 2.0 colonies par arbre sur la saison. Les infestations ne sont pas différentes selon les 3 stratégies (Kruskal Walis, $F=0.35$, $df=2$, $p=0.84$).

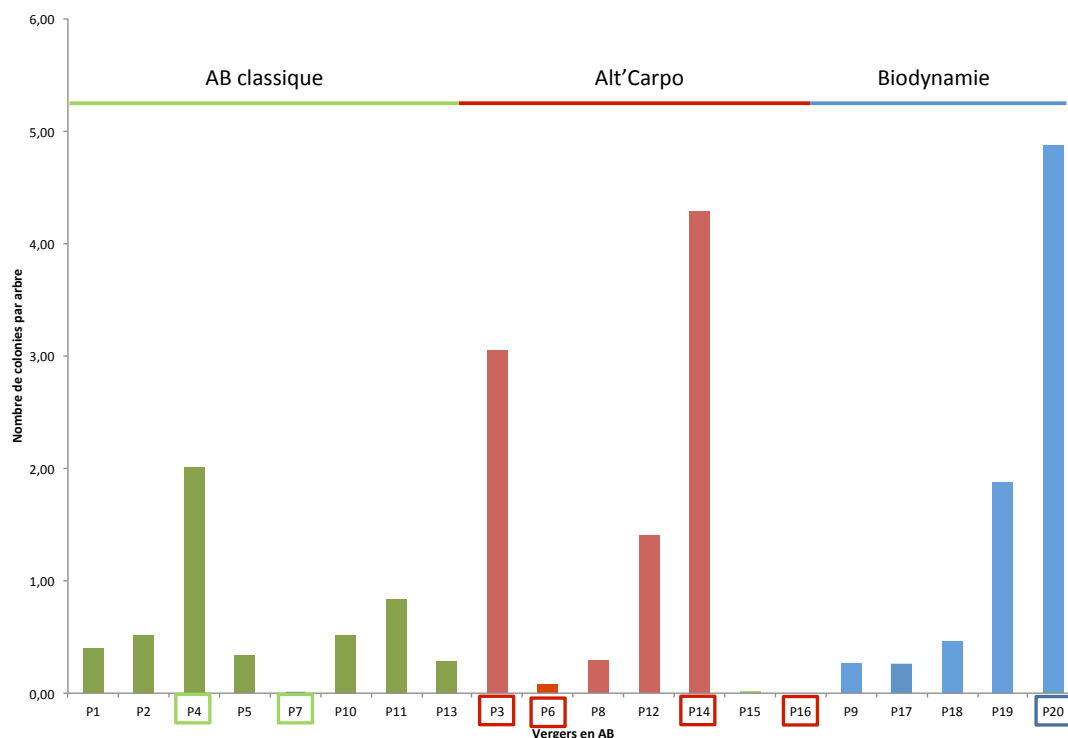


Figure 25. Nombre de colonies de pucerons cendrés par verger de pommier en AB sur la saison. Les stratégies de protection sont matérialisées en couleur (vert : AB classique ; rouge : Alt'Carpo ; bleu : Biodynamie). Les vergers encadrés P4, P7, P3, P6, P14, P16, P20 sont les vergers sélectionnés pour les analyses de contenus stomacaux.

3.2. Shift de ressources pour les prédateurs.

En G1 (mai), lorsque le puceron cendré est présent dans les vergers, le pourcentage de prédateurs ayant mangé exclusivement du puceron cendré est similaire

entre les vergers infestés et non infestés (par le puceron cendré). Le pourcentage de prédateurs ayant mangé exclusivement du carpocapse est lui aussi similaire entre les vergers infestés et non infestés. Le pourcentage de prédateurs ayant consommé les deux ressources est cependant plus élevé dans les vergers infestés. Le pourcentage de prédateurs ayant consommé du puceron cendré (non exclusivement) est supérieur en vergers infestés (73,59%) qu'en vergers non infestés (65,22%). Le pourcentage de prédateurs ayant consommé du carpocapse (non exclusivement) est supérieur en vergers infestés (24,53%) qu'en vergers non infestés (19,57%). Le pourcentage de prédateurs n'ayant consommé aucune des deux ressources testées est plus élevé dans les vergers non infestés (Fig.26).

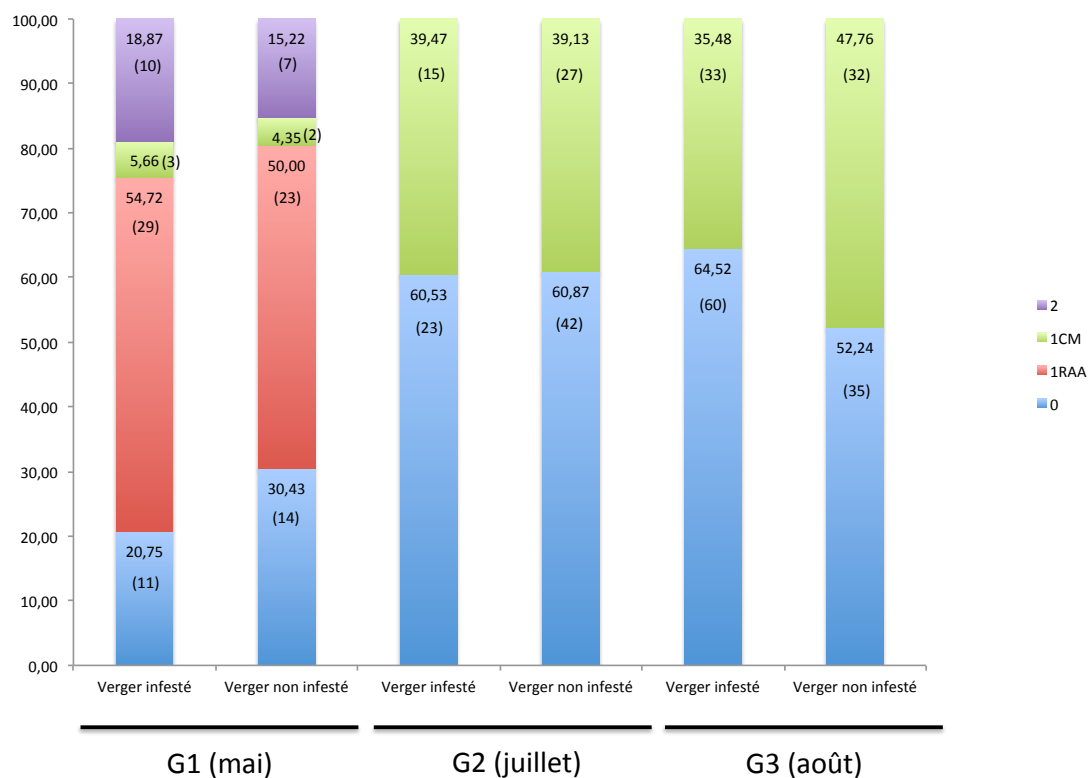


Figure 26. Pourcentage de prédateurs ayant consommé deux ressources (puceron cendré et carpocapse), une des deux ressources (1RAA : puceron cendré et 1CM : carpocapse), aucune des deux ressources testées (0) pour les vergers très infestés ou peu infestés pour trois générations de carpocapse. Le nombre de prédateurs testé selon les modalités est donné entre parenthèses.

Le pourcentage de prédateurs ayant mangé du carpocapse a augmenté entre G1 et G2 ou G3 (quand il n'y a plus de puceron cendré). En G2 (juillet), le

pourcentage de prédateurs n'ayant pas consommé du carpocapse est similaire que les vergers étaient infestés ou non en G1. En G3 (août), le pourcentage de prédateurs n'ayant pas consommé du carpocapse est supérieur dans les vergers infestés par le puceron cendré en G1 (Fig.2). Cela est dû à un seul verger (P3) qui en G3 présente une « pullulation » de *Phrurolitus festivus*, 34 araignées testées dont 30 négatives et 4 positives. Si l'on retire ce verger, le pourcentage de prédateurs ayant consommé du carpocapse est similaire entre vergers infestés et vergers non infestés avec respectivement 47,37% et 47,76%.

4. Discussion

4.1. Infestation du puceron cendré

Une grande variabilité est observée pour le taux d'infestation dans les vergers commerciaux en AB. L'infestation n'est pas significativement différente selon les stratégies Biodynamie, Alt'Carpo, Classique. Cette variabilité d'infestation a déjà été mise en évidence par Brown and Myers (2010) au sein de 24 vergers de pommes en AB au Canada. Il semblerait que l'infestation puceron cendré soit multifactorielle : climat, présence auxiliaire, infestation année n-1, application de pesticide (Brown and Myers 2010; Simon et al. 2006). L'optimisation du positionnement des traitements insecticides pourrait être un paramètre important à prendre en compte dans la gestion du puceron cendré. Cela est d'autant plus vrai en AB où il n'existe pas de produit de rattrapage.

4.2. La « perturbation » entraînée par la ressource puceron cendré sur la consommation des prédateurs généralistes

Le pourcentage de prédateurs consommant du carpocapse augmente entre mai (G1) et juillet (G2) et août (G3). En l'absence de puceron cendré, il semblerait qu'une partie des prédateurs changent une partie de leur régime alimentaire et consomment du carpocapse. Le puceron cendré représenterait donc une perturbation pour la prédation du carpocapse si l'on compare une période avec et sans puceron.

Si l'on s'intéresse à la période où le puceron cendré est présent, on voit que le pourcentage de prédateurs n'ayant consommé aucune des deux ressources est plus important dans les vergers non infestés. Le pourcentage de prédateurs ayant consommé du puceron cendré ou du carpocapse (non exclusivement) est plus important dans les vergers infestés, en G1. L'intensité d'infestation semble favorable à la prédation à la fois du puceron cendré et du carpocapse. La forte infestation de puceron cendré augmente la probabilité qu'un prédateur généraliste lors de sa recherche de nourriture trouve du puceron cendré de part son mode de chasse (Townsend et al. 2003).

On note que le pourcentage de prédateurs ayant consommé du puceron cendré dans les vergers non infestés n'est pas nul et présente des valeurs proches de celles observées en vergers infestés.

On voit à travers cet exemple que le pourcentage de prédateurs ayant consommé du puceron cendré n'est pas synonyme de régulation des ravageurs compte tenu des fortes infestations présentes dans les vergers infestés. Cela est en accord avec la littérature qui montre que le rôle des prédateurs généralistes n'est pas suffisant pour maintenir les populations de puceron cendré sous le seuil économique acceptable par les producteurs (Brown and Mathews 2007; Dib et al. 2010b).

Cependant, l'analyse de contenus stomacaux est une analyse qualitative, la dimension quantitative (quantité de puceron ou de carpocapse ingérée) n'est pas prise en compte. Or, cette dernière peut jouer un rôle dans la régulation du ravageur et la perturbation d'une ressource vis-à-vis d'une autre. Pour un prédateur, la quantité de ressource ingérée peut être supérieure dans les vergers infestés sur un temps donné, le temps de recherche de la ressource étant diminué du fait de la forte concentration de ressource. De plus, des faux positifs peuvent être pris en compte dans le pourcentage de prédateurs ayant consommés des ressources, les prédateurs peuvent en effet n'avoir consommé aucun ravageur mais consommé un prédateur en ayant consommé récemment (Boreau de Roince 2012). Ce phénomène de prédation intra-gilde peut entraîner une diminution du contrôle biologique. A l'inverse, des prédateurs ayant consommé une des deux ressources peuvent ne pas être considérés comme prédateurs, car le temps de détection de la proie dans le tube digestif du prédateur est dépassé (Boreau de Roince et al. 2012).

5. Conclusions

Nous avons suivi l'infestation puceron cendré dans 20 vergers commerciaux AB et vu que l'infestation était très variable selon les vergers sans lien apparent avec la stratégie de protection. L'infestation de puceron est souvent décrite comme multifactorielle, des travaux permettant d'élucider ces causes pourraient permettre de proposer des solutions de gestion aux producteurs.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous nous avons voulu savoir si le puceron cendré représentait une perturbation pour la prédation des œufs de carpocapse. A l'échelle de la saison, le puceron cendré semble représenter une perturbation pour la prédation du carpocapse (comparaison G1 avec G2 et G3). Lorsque les deux ressources sont présentes (G1), la forte présence du puceron cendré semble favoriser la prédation du carpocapse sans qu'une hypothèse claire puisse être avancée.

Cette étude prend en compte un nombre limité de prédateurs généralistes et un nombre limité de vergers, il serait intéressant d'étendre cette étude à d'autres prédateurs généralistes communs aux deux ressources (i.e. Coccinelle) et sur un plus grand nombre de vergers afin voir si cette tendance est confirmée.

Chapitre 3

**Augmenter la hauteur du couvert végétal
entre les rangs de pommiers n'augmente pas
le contrôle biologique du carpocapse**

Chapitre 3 : Augmenter la hauteur du couvert végétal entre les rangs de pommiers n'augmente pas le contrôle biologique du carpocapse

La gestion de l'habitat est l'une des méthodes citée comme pouvant favoriser le contrôle biologique, notamment en arboriculture avec la mise en place de haies, de bandes fleuries par exemple (Landis et al. 2000). La plupart des références scientifiques ont comparé une modalité « sol nu » avec des modalités de couverture du sol « non spontanée » (bandes fleuries, mulch synthétique ou naturel). Cependant, le sol nu est une modalité très peu retrouvée en arboriculture (elle est même absente en vergers de pommiers dans notre zone d'étude) et les modalités « non spontanées » ne sont que peu mises en place chez les producteurs de par leur coût financier et l'absence de réponses claires quant aux bénéfices espérés vis-à-vis des ennemis naturels. Bien qu'étudiés par la communauté scientifique, ces aménagements ne sont actuellement pas considérés comme des solutions par les producteurs. Une des solutions alternatives choisie par les producteurs consiste à mettre en place un enherbement spontané entre les rangs de pommiers. Un couvert végétal sur le rang est un avantage évident comparé à un sol nu en termes d'érosion, de portance du sol mais aussi en termes de bénéfices attendus pour les ennemis naturels dans le verger. Il pourrait représenter un risque de compétition pour l'eau mais ce risque est limité dans la région. Une des questions qui se pose ensuite concerne les modalités de gestion de ce couvert et notamment la fréquence de tonte. Dans le chapitre 1, quinze producteurs sur les vingt quatre enquêtés disent diminuer le nombre de fauches afin de favoriser les ennemis naturels dans l'arbre. A l'échelle de la parcelle (Chapitre 2), nous avons vu que la hauteur du couvert végétal était variable. Les instituts techniques et organismes de conseil recommandent en effet de diminuer la fréquence de fauche afin de complexifier la strate herbacée et permettre la floraison et donc de favoriser les ennemis naturels dans l'arbre (Objectifs info Arbo 2014). Notons cependant que la floraison de l'enherbement est parfois perçue comme une gêne par les producteurs qui ne peuvent alors plus utiliser théoriquement de produits phytosanitaires toxiques pour les pollinisateurs (ce risque est cependant limité en AB). Cependant, à notre grande surprise, très peu de références scientifiques sont disponibles pour appuyer cette

hypothèse : la diminution de l'intensité de fauche permet d'augmenter l'abondance et la diversité des ennemis naturels. Horton et al. (2003) se sont intéressés indirectement à la hauteur du couvert végétal en faisant varier la fréquence de fauche, leur étude montre que l'effet sur la communauté d'ennemis naturels présente dans l'arbre dépend des taxons considérés : ils observent plus d'araignées dans les couronnes des vergers où la fréquence de fauche a été diminuée (donc hauteur enherbement augmentée) alors que l'abondance des forficules n'est pas impactée. Mais, cette étude ne s'intéresse pas au service que peut rendre la communauté dans l'arbre.

Dans ce chapitre nous avons donc voulu tester les hypothèses suivantes :

- (i) l'augmentation de la hauteur du couvert végétal se traduit par une augmentation de l'abondance et/ou de la diversité de la communauté (soit au niveau global, soit par taxon d'intérêt) ;
- (ii) l'augmentation du couvert végétal a donc pour conséquence une augmentation du taux de prédation tout au long de la saison ;
- (iii) l'augmentation de la hauteur du couvert végétal ne modifie pas le lien entre la communauté d'ennemis naturels et le taux de prédation.

Increased grass cover height in the alleys of apple orchards does not promote *Cydia pomonella* biocontrol

Marliac Gaëlle ^a, Simon Sylvaine ^b, Mazzia Christophe ^c, Penvern Servane ^d,
Lescourret Françoise ^a, Capowiez Yvan ^a

Soumis à Biocontrol

^a INRA, UR1115 Plantes et Systèmes de culture Horticoles, Domaine St. Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 09 France

^b INRA, UE695 Unité Expérimentale de Recherches Intégrées de Gotheron, 26320 Saint-Marcel-lès-Valence, France

^c Université de Vaucluse et des Pays de Vaucluse, IMBE, UMR

^d INRA, Unité Ecodéveloppement, Domaine St. Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon, Cedex 09, France

Marliac Gaëlle: gaelle.marliac@avignon.inra.fr

Simon Sylvaine: simon@avignon.inra.fr

Mazzia Christophe: christophe.mazzia@univ-avignon.fr

Penvern Servane: servane.penvern@avignon.inra.fr

Lescourret Françoise: francoise.lescourret@avignon.inra.fr

Capowiez Yvan: capowiez@avignon.inra.fr

Corresponding author: gaelle.marliac@avignon.inra.fr

Highlights:

- *Forficula pubescens* abundance increased with grass cover height.
- Grass cover height did not have an effect on Araneae abundance.
- Codling moth egg predation decreased with grass cover height.
- Alternative resources in tall grass cover appear to lead to decreased egg predation in the orchard tree canopy.

Abstract:

Habitat management such as ground cover implementation in orchards is considered a promising approach to augment natural enemy abundance and diversity. However, the actual effects of grass cover management and specifically mowing frequency, on the abundance of tree natural enemies and thus on the biocontrol of major pests, are still largely unknown. We compared the effect of three heights, tall (no cutting), medium (mean height of 20 cm) and short (mean height of 5 cm), of a spontaneous grass cover in an experimental orchard on natural enemy abundance and predation rates from April to August. Early in the season (from April to May) grass cover height had no effect on codling moth egg predation. However later in the season (July and August) the predation rate increased more in the short grass cover than in the tall grass (66 % vs 38%, respectively). The abundance of the earwig *Forficula pubescens* (Gené) (Dermaptera : Forficulidae) was significantly positively correlated with egg predation in the plots with short grass but negatively correlated in the tall and medium plots suggesting that these predators could find an alternative resource in the taller grass cover.

Key words: Biological control; Natural enemy; Habitat management; Earwig; *Forficula pubescens*; *Cheiracanthium mildei*.

1. Introduction

Habitat management is an ecologically-based approach aimed at favoring natural enemies and enhancing biological control in agricultural systems (Landis et al. 2000). Classical examples of habitat manipulation are the management of hedgerows and ground cover in and around the crop to favor natural enemies. The increase in plant diversity is thought to provide natural enemies with alternative resources (i.e., prey, nectar, pollen, honeydew), day shelters (to escape disturbances due to environmental changes or pesticides), and overwintering shelters (Landis et al. 2000). In orchards, where hedgerows are common and ground cover can represent a large proportion of the cultivated area, this type of management is expected to reduce the high levels of pesticide use.

Most of the published studies on the effect of ground cover management in orchards compared bare soil with non-spontaneous ground cover such as mulch, flower strips or grass crop cover. Compared to bare soil, ground cover is a complete change in soil habitat with an important increase in complexity, shelter and resources (prey or flowers). These comparisons thus led to the clear conclusion that non-spontaneous ground cover favors arthropod abundance in trees (Markó and Keresztes 2014; Rieux et al. 1999; Silva et al. 2010; Smith et al. 1996; Wan et al. 2014). Different types of ground cover (excluding bare soil) were also compared in other studies but the conclusions were far less clear-cut. For example, Markó et al. (2014) compared a frequently mowed natural grass cover with a flower cover and observed higher Araneae and Chrysopidae abundances in trees with the flower ground cover, but no difference in Coccinellidae abundance. In contrast, Silva et al. (2010) found that the abundance of Araneae, Coccinellidae and Chrysopidae did not vary between natural or sown grass cover (i.e. a cover of plants selected to produce nectar and pollen for an extended flowering period).

Sowing a ground cover and/or a flower cover in orchard alleys can have some direct economical consequences but also some indirect drawbacks (some pesticides are forbidden when flowers are present to protect pollinators). Manipulating the existing (i.e. “spontaneous”) ground cover is a less expensive alternative. Indeed some growers already use this habitat manipulation approach by decreasing mowing frequency. Mowing, which represents a mechanical disturbance in itself, affects the

height of the grass ground cover and its complexity (Horton et al. 2003; Kruess and Tschamntke 2002; Langelotto and Denno 2004). This increase in complexity is thought to influence arthropod numbers in the cover, through increased shelter and also alternative food (i.e., nectar and pollen) which decrease intra-guild predation. However, an increase in natural enemy abundance in the grass cover does not necessarily translate into a higher abundance in the trees (Horton et al. 2003). The movement of natural enemies between the grass cover and the tree canopy could be driven by several factors: the natural enemy's mobility, the physical proximity of the strata, prey availability, anthropic disturbance, the living conditions including microclimate and (maybe) predation escape (Horton et al. 2009; Lawton 1983; Schellhorn et al. 2014). Finally, changes to the natural enemy community of the tree canopy are expected to have positive consequences on pest control. However, the relationship between natural enemy diversity and pest control is strongly dependent on the predator species composing the community (i.e. temporal presence, efficacy) and their interactions (i.e., intraguild competition, resource competition) (Straub et al. 2008).

In south-eastern France, the current grass covers found in orchard alleys shelter a community of natural enemies with the potential to control apple pests ((Simon et al. 2007). The main pest is the codling moth *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Tortricidae), which is targeted by 12 insecticide applications on average (Sauphanor et al. 2009) unless alternative methods such as mating disruption are used. Codling moth has two or three yearly larval generations in south-eastern France and the egg stage is the most crucial for biocontrol to avoid damage to the fruit by the larvae. Both egg predation and, to a lesser extent, parasitism (Monteiro et al. 2013) could contribute to this early-stage biological control. The guild of generalist predators active against Lepidoptera eggs during the period that codling moth are also present in apple trees has been documented: earwigs (*Forficula spp.*, Dermaptera: Forficulidae) (Glen 1977), spiders (Araneae) (Glen 1977; Pearce et al. 2004), ladybirds (Coleoptera: Coccinellidae) (Chang and Snyder 2004; Evans 2009; Glen 1977), and true bugs (Hemiptera: Miridae) (Glen 1977). Aphids, including the rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* (Passerini) (Hemiptera: Aphididae), are alternative preys that can be shared by these predators (Dib et al. 2010b).

In this experimental study, our aim was twofold. First, we studied the temporal variation in predation rate in the apple tree canopy across the season. Second, when predation was the highest, we investigated whether changes in the height of the natural grass cover would have an impact on the natural enemy abundance and diversity in the trees and in turn modify predation. The sentinel eggs technique (Glen 1977) was used to assess the natural enemy predation activity. Three heights of grass cover were compared in the orchard: Tall (no mowing), Medium (20 cm height maintained throughout the whole season) and Short (5 cm height maintained throughout the whole season). These three grass heights represent three levels of physical disturbance (due to mowing frequency), complexity and resource availability for natural enemies during the growing season within the orchard alleys.

2. Material and methods

2.1. Experimental orchard and study grass covers

The study was conducted in a National Institute for Agricultural Research (INRA) experimental apple orchard (0.2 ha) in Avignon (south-eastern France) from 25 April to 22 August 2013 (one sampling date per month). The orchard was planted in 2007. It was under a minimal pesticide management program. Only two pesticides were applied during the study: bupirimate (7 May) to control the powdery mildew fungal disease and *C. pomonella* granulosus virus (7 July) to control codling moth. The orchard had six rows of 60 trees. The rows were spaced 4 m apart and the apple trees were spaced 1.5 m apart within each row.

The alley vegetation was a four meter wide spontaneous ground cover. It was composed mainly of *Trifolium repens*, *Festuca pratense* and *Taraxacum officinale* mixed with some *Trifolium pratense*, *Lolium perenne*, *Convolvus arvensis*, *Plantago lanceolata*, *Plantago major*, *Picris echioides*, *Crepis sancta*, *Bellis perenis*, *Veronica persica* and *Dactylis glomerata*.

The ground cover was mowed using a line trimmer. Ground cover in both the row and alley were managed in the same way. Three management regimes and corresponding ground cover heights were defined: Tall, no mowing during the whole study period; Medium, mowed every two weeks to maintain the grass cover height at

20 cm on average; and Short, mowed every week to maintain the grass cover height below 5 cm. In the Tall, i.e. ‘no mowing’ regime, the height of the ground cover regularly increased and it was taller than 40 cm from May to September. Since both the rows and alleys were uncut, during summer the tallest plants in the ground cover “overlapped” with the lowest tree branches. Twelve plots were defined within the orchard, each including 30 trees in total with 10 trees in three successive rows. Four plots were used for each mowing regime in a randomized block design. At the first sampling date (i.e., April), the ground cover was not yet tall enough to be considered in the Tall plots.

2.2. Predation rate of codling moth sentinel eggs in the apple canopy

We used eggs of a susceptible *C. pomonella* laboratory strain reared on an artificial diet (INRA, Avignon, France) to assess egg predation (Glen 1977). Egg laying sheets (30 cm × 30 cm) were placed in the rearing cages at dusk and females were allowed to lay eggs for 12 h. The following morning, the eggs were sterilized under a UV lamp (20W) for 20 s (Monteiro et al. 2013). The sheet was cut into cards containing an average of $8.75 \pm \text{SD } 1.28$ eggs. Ten cards were placed in each plot (forty cards in total for each grass cover height) excluding trees at the border of plots. Each card was stapled to the lower side of a leaf at the outside of the canopy at 1.5 m height. After 2.5 days exposure to natural enemies, the cards were removed and the predation rate was assessed by determining the ratio of the number of remaining eggs to the number of exposed eggs per card. Egg predation was assessed in five successive months, on 25 April, 24 May, 27 June, 19 July and 22 August 2013.

2.3. Natural enemy abundance and diversity

The abundance of natural enemies in the tree canopy was estimated in the plots at the same five dates. In each plot, at each date, ten corrugated cardboard band traps (i.e., forty for each grass cover height) were wrapped around a branch, on the same trees where the predation rate was estimated. The traps were placed one week before the exposition of sentinel eggs and removed one week after the exposure. To

avoid possible interactions between the trap and the sentinel eggs on the same tree, these were never placed on the same branches.

Once removed, the traps were individually closed in a plastic bag then opened under laboratory conditions and any arthropods stored in 70% ethanol for further identification. According to the relative abundance of sampled arthropods, we defined Observable Taxonomic Units (OTU) such as earwigs at the species level (*Forficula auricularia* (Linnaeus) and *Forficula pubescens* (Géné) (Dermaptera : Forficulidae)), spiders at the family level (Araneae, mainly Salticidae, Gnaphosidae, Miturgidae and Thomisidae), while Coccinellidae (mainly *Adalia bipunctata* (Linnaeus), *Harmonia axyridis* (Pallas), *Scymnus* spp. (Coleoptera: Coccinellidae)) or predatory Miridae (mainly *Pilophorus* spp. and *Deraeocoris* spp.) were grouped at the family level.

2.4. Statistical analysis

To determine whether the different grass cover heights (Tall, Medium and Short) influenced egg predation and the abundance of predators, we applied a generalized linear model (GLM) at each date with, respectively, a Binomial error distribution with logit link function and a quasi-Poisson error distribution. A multiple post-hoc test (Tukey test) was performed to detect any significant difference between the plots.

The relationships between codling moth egg predation and the abundance of natural enemies were studied using two approaches. In the first approach, we focused on the temporal dynamics of the predation across the whole season to determine which natural enemies were likely to contribute the most to this dynamic. In the second approach, which was carried out on data collected in July and August only, when the predation rates were much higher, we assessed the effects of the grass cover heights on the abundance of natural enemies and on the predation rate. For both approaches the same method was applied. A generalized linear model (GLM) was used with a Binomial error distribution and a logit link function. An information-theoretic approach including all the candidate models (based on the fit of all possible variable combinations) was used. The best model was selected using the Akaike Information Criterion (AIC) (Zuur et al. 2009).

For all GLM procedures, model parameters were considered to be significant at a level of 1% (Zuur et al. 2009).

Generalized linear models were performed with the lme4 package (Bates et al. 2014), and the information-theoretic approach with the package MuMin (Barton 2013) in the R 2.14.1 software (R Development Core Team 2010).

3. Results

3.1. The natural enemy community

A total of 20,537 natural enemies were caught on the five sampling dates. Earwigs and spiders were the most abundant groups, representing 96.75 % and 3% of the total arthropods, respectively. The other natural enemy groups (Coccinellidae, Miridae) were found in percentages below 0.01%. Two species of earwig were found: *F. auricularia* (26.5% of the earwigs) and *F. pubescens* (73.49%). The spider community consisted of Salticidae (74.39% of the Araneae community), Gnaphosidae (9.70%), Miturgidae (only one species: *Cheiracanthium mildei* (L. Koch) (Araneae : Miturgidae), 3.63%), Philodromidae (3.64%), Thomisidae (1.82%) and Clubionidae (0.30%).

Salticidae were the most common Araneae family in the tree canopy, they were present during the whole the season with a peak of abundance in April. Gnaphosidae and Miturgidae were present late in the season (i.e., August). Very few Thomisidea and Philodromidae were present in the tree canopy (Tab. 8).

	Height	Miturgidae	Salticidae	Gnaphosidae	Thomisidea	Philodromidae
April	Short	0,28	18,33	0,83	0	0
	Medium	0	16,57	0,71	0	0,14
May	Short	0,56	5,28	0,55	0	0
	Medium	0	6,21	0	0	0
	Tall	0	10,83	0,28	0	0,28
June	Short	0,51	6,41	0,26	0	0
	Medium	0,26	6,67	0,26	0	0
	Tall	0	5,26	0,26	0,53	0,26
July	Short	0,75	6,5	2,25	0,5	0,25
	Medium	0,75	6	1,25	1,75	0
	Tall	0,28	6,39	1,94	0,28	0,55
August	Short	1	6,5	3,25	0	0,75
	Medium	0,77	7,43	2,05	0	1,28
	Tall	1,03	7,43	2,05	0	1,54

Table 8. Mean abundance (x 10) of spider per trap in the tree canopy at each date in each plot type (i.e., Tall, Medium, Short grass cover).

There was no difference in the abundance of any Araneae family (i.e., Miturgidae, Clubionidae, Gnaphosidae, Thomisidae, Philodromidae and Salticidae) among the three grass cover heights at any sampling date (Tab.8).

The mean abundance of *F. auricularia* (\pm SE) per tree steadily increased from April to July (peak of presence) and decreased in August. However the height of the grass cover did not have a significant effect on their abundance at any time from April to August (Fig. 27a).

The mean abundance (\pm SE) of *F. pubescens* per tree increased slowly until June (6.81 ± 0.60 , 5.90 ± 0.7 and 6.30 ± 0.7 in the Tall, Medium and Short plots, respectively) with no difference among plot types. The peak of abundance was observed in July with a significantly higher abundance in the Tall (117.72 ± 11.27) ($p < 0.001$) plots and marginally more in the Medium (101.00 ± 8.29) ($p = 0.014$) than in the Short plots (64.45 ± 7.11). *F. pubescens* abundance decreased in August with a higher abundance in the Tall (28.13 ± 3.11) and Medium (26.72 ± 4.03) than in the Short plots (10.1 ± 1.24) ($p < 0.001$) (Fig. 27b).

3.2. Predation rates

The predation rate of codling moth eggs was low (below 0.2) from April to June, then increased significantly in July and August (between 0.35 and 0.70) (Fig. 27c).

The height of the grass cover had a significant impact on the predation rate. In June, the predation rate (mean \pm SE) in the Tall plots (0.16 ± 0.05) was significantly higher than in the Short plots (0.05 ± 0.02) ($p < 0.001$). In July, the predation rates in the Short and Medium plots (0.66 ± 0.07 ; 0.58 ± 0.07 , respectively) were significantly higher than in the Tall plots (0.38 ± 0.07) ($p < 0.001$). In August, the predation rates decreased and were significantly higher in the Short (0.49 ± 0.07) than in the Medium plots (0.37 ± 0.07) ($p = 0.007$).

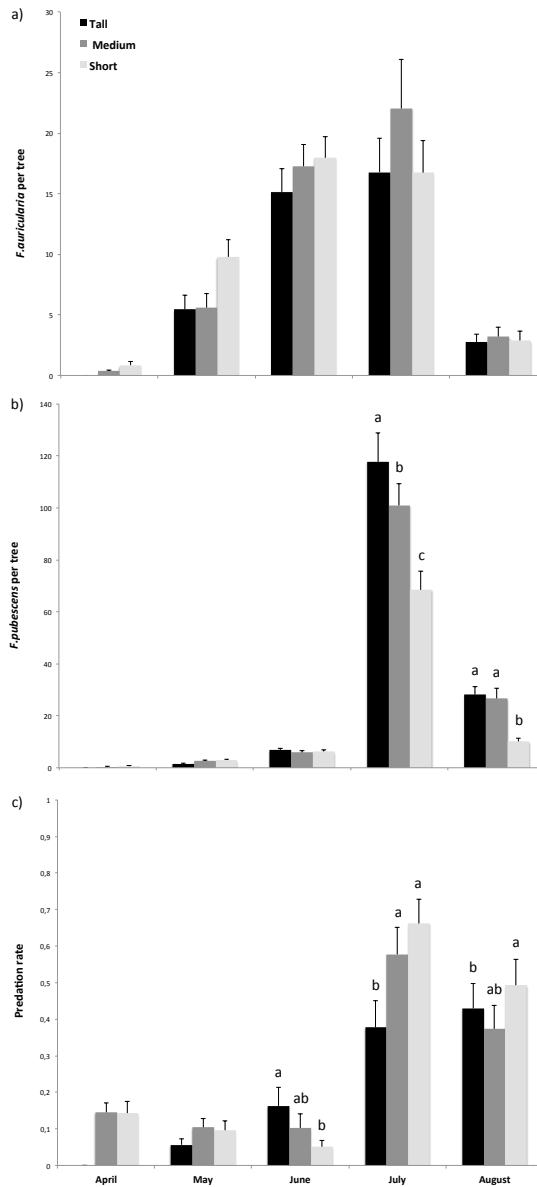


Figure 27. Temporal dynamic of (a) the mean abundance per trap of *F. auricularia* (\pm SE), (b) the mean abundance per trap of *F. pubescens* (\pm SE) and (c) predation rate of the codling moth egg (\pm SE) according the grass cover modalities in apple orchard (i.e Tall, Medium, Short height).

3.3. Link between predation and abundance of natural enemies

The best models linking the predation rate and natural enemy abundance across the season (first approach) for each grass cover height are shown in Table 9.

(a) Short		Estimate	SE	Z value	
	(Intercept)	-1.97105	0.14400	-13.688	**
	<i>F. auricularia</i>	-0.59832	0.06009	-9.958	**
	<i>F. pubescens</i>	0.90184	0.05442	16.573	**
	Gnaphosidae	0.41722	0.13640	3.059	*
	Philodromidae	0.56165	0.34782	1.615	
	Salticidae	0.10548	0.04506	2.341	
(b) Medium		Estimate	SE	Z value	
	(Intercept)	-2.00698	0.10253	-19.575	**
	<i>F. auricularia</i>	-0.11579	0.05336	-2.170	
	<i>F. pubescens</i>	0.48743	0.04063	11.997	**
	Miturgidae	1.03957	0.29214	3.558	**
	Philodromidae	0.72367	0.29148	2.483	
	Thomisidae	-0.32734	0.21509	-1.522	
(c) Tall		Estimate	SE	Z value	
	(Intercept)	-2.08974	0.18391	-11.363	**
	<i>F. auricularia</i>	-0.12665	0.06315	-2.005	
	<i>F. pubescens</i>	0.41536	0.04758	8.729	**
	Miturgidae	1.21174	0.32106	3.774	**
	Gnaphosidae	0.26330	0.16562	1.590	
	Philodromidae	-1.07810	0.30271	-3.562	**
	Thomisidae	-0.92280	0.64113	-1.439	
	Salticidae	0.10538	0.06111	1.724	

Table 9. Best generalized linear models selected using the Akaike information criterion linking the predation rate and natural enemy abundance in whole season for (a) Tall, (b) Medium, (c) Short height grass cover. Natural enemies with significant effects on predation rate are in bold.

In the Tall plots, *F. pubescens* and Miturgidae had a significant positive effect while Philodromidae had a significant negative effect. In the Medium plots, *F. pubescens* and Miturgidae had a significant positive effect. In the Short plots, *F. pubescens* and Gnaphosidae had significant positive effects while *F. auricularia* had a significant negative effect on the total predation rate.

The best models linking the predation rate and the natural enemy abundance, in July and August only (second approach), for each ground cover height are shown in Table 9. In the Tall plots, Miturgidae had a significant positive effect while Philodromidae had a significant negative effect on the total predation rate. In the Medium plots, Miturgidae, *F. auricularia* and Philodromidae had a significant positive effect while *F. pubescens* had a significant negative effect on the total predation rate. In the Short plots, *F. pubescens* had a significant positive effect on total predation rate.

4. Discussion

4.1. Natural enemy communities

Earwigs dominated the community. Spider abundance was much lower and other natural enemies were rare. Our sampling method (corrugated cardboard band traps) affected this result at least in part. First, some predatory arthropods such as coccinellids or mirids are hardly ever sampled by this type of trap. Second, earwigs produce an aggregation pheromone (Sauphanor and Sureau 1993) that increases their abundance in traps (Burnip et al. 2002).

F. auricularia abundance increased steadily from April to August whereas a marked peak in *F. pubescens* numbers was observed in July. Simon et al. (2011) observed a similar increase in the total earwig abundance in July in apple orchards in south-eastern France whereas Romeu-Dalmau et al. (2012) observed the same pattern for *F. auricularia* in May in citrus orchards in Spain (i.e., two months earlier than in our study). The difference in temperature between Southern France and the region in Spain could explain the difference in the development of this insect (Helsen et al. 1998). In our study, only *F. pubescens* was found in higher abundance in plots with Tall ground cover. The same numbers of *F. auricularia* were found in the three plot types, which is in agreement with Horton et al. (2003) who did not observe a significant difference in earwig abundance in pear orchards under different grass cover mowing regimes.

The three grass cover management regimes used in our study also had no effect on spider abundance. In contrast, Horton et al. (2003) found that mowing frequency did affect spider abundance in a pear orchard, with more spiders found in the trees where the alleys were mowed less frequently. In the present study, the abundance of Salticidae, the major family found in the tree canopy, did not increase when grass height increased. This is not surprising because the Araneae community in the studied apple trees is essentially arboreal and very few species (some Gnaphosidae) were found in both the tree canopy and in the grass cover during the season (Bogya et al. 2000).

4.2. Link between sentinel egg predation and natural enemies

In the present study, we recorded data on the dynamics of egg predation rates in French apple orchards for the first time. The predation rate of codling moth eggs in the studied apple orchard increased from April to July and reached a peak in July and August. These results are consistent with those of Monteiro et al. (2013) in apple orchards and Atanassov et al. (2003) in peach orchards. The sequential arrival of natural enemies could explain the temporal dynamics of the predation rate. At the beginning of the season, few natural enemies were present in the tree canopy. Salticidae prevailed among natural enemies but due to their “sit and wait” hunting mode (, they are not expected to eat static prey such as eggs. Earwigs are known to eat Lepidopteran eggs (Glen 1977) and the large increase in *F. pubescens* abundance in apple trees in July correlated well with the increase in predation rate (Fig 27a-b and Table 9: *F. pubescens* positively correlated with the predation rate regardless of grass height). In contrast, the increase in *F. auricularia* abundance from May onwards did not lead to an increase in the predation rate of codling moth eggs (Fig 27a-c and Table 9); *F. auricularia* was negatively correlated with the predation rate in the areas with short grass cover whereas this species had previously been identified as a predator of codling moth eggs (Glen 1977). Although present in the apple canopy, *F. auricularia* might not have fed exclusively on codling moth eggs at the beginning of the season (from April to June). In spring, *F. auricularia* is known to feed on rosy apple aphids (Dib et al. 2010b) before switching to codling moth eggs (Symondson et al. 2002). Even if Miturgidae abundance was very low, the results of both modeling approaches suggested that they were significantly and positively correlated with the predation rate in the Tall and Medium plots (Table 9). This indicates that they could be predators of codling moth eggs and confirms that their phenology (i.e., presence of active stage) correlated well with the presence of codling moth eggs in apple orchards (Glen 1977), making them an efficient predator (Hogg and Daane 2011). In the tall grass cover Philodromidae negatively affected the predation rate suggesting that this grass cover favored these hunting species which can prey on other natural enemies.

Management of grass cover height did not improve the predation rate at the beginning of the season (from April to June). For apple growers, high predation early in the season would be of interest to limit both fruit damage and codling moth

populations in the next generation. The abundant aphid community commonly sheltered by the Poaceae grass cover early in the season (Simon et al. 2007) may offer a more easily available resource than prey scattered in the tree canopy; natural enemies (in particularly omnivorous predators such as *F. pubescens*) may therefore be diverted from the target prey in the apple tree (i.e. codling moth egg) by prey resources in the grass cover. Several factors and processes related to species behavior and the ecology of the natural enemy complex (sequential arrival, prey preference, habitat preference, insect mobility, intra-guild predation) could be involved in the complex interactions between predation and resource availability.

The height of the grass cover, however, did appear to influence predation later in the season. Indeed, in July and August, predation rates of the codling moth eggs were lower in the Tall plots whereas *F. pubescens* abundance was higher in these plots than in either of the others. The decrease in mowing frequency and the resulting increase in the height of the grass cover was not favorable to the within-tree predation rate and even modified the link between the predation rate and *F. pubescens* (Table 9); *F. pubescens* correlated negatively with egg predation in the Medium plots and positively in the Short plots (second approach). Miturgidae correlated positively with the predation rate in the Tall and Medium plots. As an omnivorous predator, *F. pubescens* can feed on other resources which may thus reduce its predatory activity or redirect it to other species (Robinson et al. 2008). This could be the case in the Tall plots where nectar resources provided by the grass cover were abundant and close to the tree canopy (*F. pubescens* was visually observed to feed on *Senecio* spp.). Thus in this scenario they would eat less target prey. An alternative hypothesis is that the foraging area for localizing prey is larger in the Tall modality which would lead to a decrease in the predation efficacy in such a complex (i.e., multi-strata) habitat (Langellotto and Denno 2004).

5. Conclusion

In this study we showed that grass cover height in the alleys of an apple orchard had a significant impact on the abundance and predatory behavior of a generalist predatory arthropod: in July and August tall grass cover was correlated with increased *F. pubescens* abundance in the apple canopy, but lower egg predation. This result

could be due to the presence of alternative resources in the grass and/or trees. Indeed we did observe *F. pubescens* foraging in the ground cover as well as the trees. Growers must therefore manage the tradeoff between promoting natural enemies (i.e., providing them with resources) and encouraging predators to mostly prey in the tree canopy where pest control is needed. The timing and spatial distribution of mowing (e.g. mowing one alley out of two in the orchard) appears to be crucial and should be studied further. For example growers could use a no mowing regime early in the season to first promote the abundance of natural enemies and then favor arboreal predation by reducing grass resources during key-periods for pest control.

Acknowledgments

The authors are grateful to Sandrine Maugin for providing codling moth eggs and Lachaize-Muller Amaya for assistance in the field and lab. The research project received funding from the European Union Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under the grant agreement n°265865. The PhD fellowship of the first author was jointly financed by the ANR DynRurABio program and the INRA Smach metaprogram.

Chapitre 4

Prédation des larves de carpocapse au sol dans les vergers de pommiers et le rôle jusqu'ici sous-estimé des opilions

Chapitre 4 : Prédation des larves de carpocapse au sol dans les vergers de pommiers et le rôle jusqu'ici sous-estimé des opilions

Le carpocapse possède une partie de son cycle qui se déroule au sol. Après avoir quitté les fruits en descendant le tronc ou par un fil de soie, les larves au dernier stade de développement (L5) vont trouver un refuge dans l'écorce de l'arbre ou le sol. Augmenter significativement la prédation des larves au sol permettrait de diminuer les populations des générations suivantes et ainsi contribuer à la régulation de ce ravageur. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour observer les prédateurs des larves de Lépidoptère. Mathews et al. (2003) ont par exemple utilisé des larves sentinelles couplées à des observations humaines pour étudier l'impact de différents **couverts végétaux** sur la prédation. Ils ont observé des taux de prédation de 70% en sol nu contre un taux de prédation de 35% avec un sol couvert par un mulch synthétique. En vigne, Frank et al. (2007) ont associé l'utilisation de larves sentinelles et de vidéo pour estimer le taux de prédation et les prédateurs de larves de lépidoptère. Ils ont observé un pourcentage de prédation de 58% et identifié les forficules comme des prédateurs efficaces dans leur cas d'étude.

D'autres études en vergers de pommiers ont permis d'identifier des prédateurs de larves de carpocapse sans l'associer à un taux de prédation avec des études en laboratoire (Glen et al. 1978) ou des analyses de contenus stomacaux via des analyses moléculaires (Boreau et al. 2010). Les prédateurs déjà identifiés comme consommant des larves au sol sont: des carabes (*Pterosticus spp*), des arachnides (par exemple les Lycosidae).

Cependant, la communauté du sol est composée par d'autres taxons qui pourraient exercer un rôle de prédation (à cause de leur régime alimentaire et de leur période de présence). Le couplage d'utilisation de larves sentinelles de carpocapse et de vidéo permettra de confirmer les résultats de la littérature voire d'apporter de nouvelles réponses.

Les communautés au sol sont affectées par les pratiques mises en place en verger : la gestion de l'habitat au sol (étude de Mathews et al. (2003)) ou la sélectivité des pesticides (moins toxique en protection intégrée ou en AB) C'est notamment le cas des deux principaux taxons suspectés, les carabes et les arachnides qui peuvent

être à la fois impactés par le mode de protection phytosanitaires (araignée : Park et al., 2007; Santos et al., 2007; Pekar and Benes, 2008; Marko et al., 2009; et carabe : Gronning et al. 2007, Epstein et al. 2001, Kromp et al. 1989) et la hauteur de la couverture du sol (Horton et al. 2003, Horvath et al. 2008, Dobbs et al. 2013). Ces impacts sur la communauté des prédateurs présente au sol peuvent donc se répercuter sur la prédation des larves au sol.

Dans ce chapitre nous avons donc voulu tester les hypothèses suivantes :

- (i) Il existe des prédateurs non identifiés au sol qui peuvent consommer des larves de carpocapse ;
- (ii) Les prédateurs identifiés comme consommant des larves sont affectés par le mode de protection phytosanitaire et la hauteur de l'enherbement ;

Predation of codling moth larvae on the ground of apple orchards and the underestimated role of Opiliones

Marliac Gaëlle^a, Simon Sylvaine^b, Mazzia Christophe^c, Alain Pasquet^d,

Jodie Thénard^e, Mickael Hedde^e, Servane Penvern^f,

Françoise Lescourret^a, Capowiez Yvan^a.

À soumettre à Journal of pest science (7000 mots)

^a INRA, UR1115 Plantes et Systèmes de culture Horticoles, Domaine St. Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 09 France

^b INRA, UE695 Unité Expérimentale de Recherches Intégrées de Gotheron, 26320 Saint-Marcel-lès-Valence, France

^c Université de Vaucluse et des Pays de Vaucluse, IMBE, UMR, France

^d UR AFPA, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Lorraine, Boulevard des aiguillettes, BP 239, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex, France

^e UR 251Pessac, Centre de Versailles-Grignon, 78026 Versailles cedex, France INRA

^f INRA, Unité Ecodéveloppement, Domaine St. Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon, Cedex 09, France

Corresponding author:

Marliac Gaëlle

INRA, UR1115 Plantes et Systèmes de culture Horticoles, Domaine St. Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 09 France

+33 4 32 72 22 88

gaelle.marliac@avignon.inra.fr

Abstract:

Increasing the biological control of codling moth in apple orchards could potentially aid to decrease the use of pesticide.

Using video recording and sentinel larvae, we investigated the predators of codling moth larvae on the ground and the impact of the grass cover management (Tall: no cutting, medium: height of 20 cm, short: height of 5cm) and pesticide use (by comparing Conventional, Low input and Organic strategies) on the predation of codling moth larvae and on the predators. We identified by video recording predators already known to consume codling moth larvae on the ground (Araneae, Carabidae, Formicidae), Opiliones which had never been identified as a predator of Lepidoptera larvae in agroecosystems, were observed as active predator. The decrease of pesticide use increased the predation of the codling moth larvae and Opiliones abundance whereas increasing the height of the grass cover had no effect.

Key words: Biological control, *Cydia pomonella*, Opiliones, pesticide use, habitat management.

1. Introduction

Codling moth (*Cydia pomonella* L.) is the main pest in apple orchards of South-East France. This Lepidopeteran pest has two or three larval generations per year and spends a portion of its life cycle on the orchard floor before entering diapause where it is exposed to ground-dwelling predators. Late instar codling moth larvae in orchards suffer high levels of predation if they drop from the canopy to the ground in search of pupation site (Epstein et al. 2001; Glen and Milsom 1978). Several studies have focused on their predation by birds (Mols et al. 2005; Mols and Visser 2002; Solomon and Glen 1979), but few studies have focused on their predation by the ground-active predators. The arthropods identified as potential predators are: spiders (Arachnida: Araneae), ground beetles (Coleoptera: Carabidae), ants (Hymenoptera: Formicidae), staphylinids (Coleoptera: Staphylinidae) and earwigs (Forficulidae) (Bureau de Roince et al. 2012; Frank et al. 2007; Glen and Milsom 1978; Mathews et al. 2004; Riddick and Mills 1994).

In South-East France, apple orchards are targeted by 36.5 treatments on average per growing season (Sauphanor et al. 2009), which could affect the ground-dwelling predators (Minarro et al. 2009). In many cases, the application of pesticides led to a decrease in both the abundance and diversity of spiders (Markó et al. 2009; Park and Kim 2007; Pekár and Beneš 2008; Santos et al. 2007) or of ground beetles (Epstein et al. 2001; Kromp 1989).

Furthermore, the ground-dwelling generalist predators can be promoted by some manipulations of the ground habitat that provide them with shelter and/or alternative resource (Landis et al. 2000). Spontaneous grass covers are commonly encountered in orchard areas with variable mowing frequency among growers. Mowing, which represents a mechanical perturbation in itself, affects the height of the grass ground cover and its complexity (Horton et al. 2003; Kruess and Tschardtke 2002; Langellotto and Denno 2004). This increase in complexity could increase the spider (Dobbs and Potter 2014; Horvath et al. 2009) and ground beetle abundance (Dobbs and Potter 2014; Horton et al. 2003) through higher abundance of shelters and of alternative food as well, thus decreasing intra-guild predation.

While these practices are able to influence the abundance and diversity of the ground-dwelling predators, little is known about the consequences on the predation of late instars of codling moth larvae. Mathews et al. (2004) investigated the impact of four habitat treatments (i.e. compost mulch, synthetic mulch, herbicide treatment, bare soil) on the predation of codling moth larvae and showed that the predation was lower in compost mulch than in herbicide mulch. They deduced that the habitat structure was important for the predation of *C. pomonella*.

In this study, our aim was twofold. First, we tried to identify the predators of codling moth larvae and their efficiency by video recording. The video recording makes it possible to avoid the drawbacks of direct observation (Mathews et al. 2004) and of molecular gut analysis (Boreau de Roincé et al. 2012) and to measure an activity (number of attacks, number of successful attacks) of the predators. Second, we attempted to analyse the effect of a pesticide use and of an increase of ground cover complexity on the predation of sentinel codling moth larvae and their predators assessed by video recording.

2. Material and methods

2.1. Sentinel larvae

Sentinel codling moth larvae were used to evaluate rates of predation on the ground of apple orchard. Larvae were obtained from lab rearing on an artificial diet as described by Guennelon et al. (1981). Codling moth larvae of fifth instar (2 cm long) were positioned on the middle of the inter-alley on the ground. All codling moth larvae were secured in their respective positions on carton card using size '0' insect pins (Frank et al. 2007). Codling moth larvae were pinned through their penultimate abdominal segment.

2.2. Video monitoring and analysis

Codling moth larvae were monitored with video cameras (Sony PJ740 with infrared vision) to determine which predators were attacking and consuming them on

the ground of the studied apple orchards. Forty-two larvae, divided between the study case describe below, were monitoring.

The cameras were positioned approximately 10 cm above larvae that were on the ground. From the recordings, the time and taxon of each predator attack and the time of death of each larva were noted. Each predator attack was classified as unsuccessful (i.e., *C. pomonella* was attacked but not killed) or successful (i.e., the attack resulted in the death of *C. pomonella*). This enable the calculation of: (1) the number of attacks for each taxon, (2) the number and percentage (i.e. successful attacks/ total attack x 100%) of attacks resulting in death of the larvae for each taxon, (3) the efficiency of each taxon (i.e., succesfull attacks per taxon/ total of successful attacks x100%) and (4) the time of the larvae death for each taxon.

Carabidae (identified as predators in the litterature and by video recording) were collected using pitfall traps (diameter = 11 cm, depth = 8 cm) partially filled with a solution of diluted (1:5) ethylene glycol mixed with a few ml of detergent. Adults Carabidae were identified to the species level. Three functional traits of carabidae were chosen: activity (nocturnal vs diurnal); size; diet (Granivorous, Zoophagous) and completed for each species thanks to BETSI program.

2.3. Two study cases

Two situations were studied with a gradient of pesticide use and one a gradient of grass cover height.

The experiments were conducted during 8 nights, between 12 July and 25 September 2013. The larvae were exposed during 2 hours from the dusk. The cards were checked after one and two hours in order to note the state of the larvae and the predators presents on the card (human observation). The rate of predation was calculated after two hours of exposition.

2.3.1. Pesticide study case

Three protection systems were defined to manage pests, diseases and weeds in an experimental orchard at the National Institute for Agricultural Research (INRA)

Gotheron experimental unit. They represent a decreasing gradient of pesticide use. They were described by Simon et al. (2011):

1. Conventional: Chemical pesticides were mainly and sometimes exclusively used to control pests, diseases and weeds. The elaborated decision rules proposed a supervised use of the pesticides, generally to be applied when an infection or infestation risk was identified or forecast by extension services.

2. Low input: This strategy mainly relied on the use of alternative methods, including mating disruption, microbiological control, sanitation practices and labour input. Additional pesticide applications were based on the evaluation of the local infection or infestation risks.

3. Organic farming: The general tactic was the ‘no synthetic input rule’ (with the exception of compounds such as pheromones) defined by the European rules for organic production (EEC 91/2092). Organic compounds presenting documented negative effects (i.e. copper and rotenone) also had their use limited to two applications per year. Alternative methods were privileged.

The inter-alley vegetation was a spontaneous ground cover which was maintained at 5cm height.

In this study case, 48 larvae were exposed on each modality of pesticide use.

2.3.2. *Habitat management study case*

Three modalities of height of grass cover were defined in an experimental apple orchard at INRA Avignon: Tall (no mowing during the whole study period), Medium (mowed every two weeks to maintain the height of the ground cover at 20 cm on average) and Short (mowed every two weeks to maintain the height of the ground cover below 5cm).

The inter-alley vegetation was a spontaneous ground cover. It was composed mainly by *Trifolium repense*, *Fetuca pretense*, *Taraxacum officinale*, and in minority by *Trifolium pratense*, *Lolium perenne*, *Convolvus arvensis*, *Plantago lanceolata*, *Plantago major*, *Picris echioides*, *Crepis sancta*, *Bellis perenis*, *Veronica persica* and *Dactylle glomerata*. A minimal pesticide management program was applied in the

experimental orchard. The only pesticide that was used during the study was applied to control codling moth using *C. pomonella* granulosisvirus (7 July).

In this case of study, 116, 118 and 116 larvae were exposed in the Tall, Medium and Short grass cover modalities respectively.

2.4. Statistical analysis

To determine whether the level of pesticide use (Conventional, Low input, Organic) and the height of grass cover (Tall, Medium, Short) influenced the predation of larvae or the abundance of generalist predators, we applied a generalized linear model (GLM) with, respectively, a Binomial error distribution (success: predation of the larvae or failure: no predation) with logit link function and a quasi-poisson error distribution. A multiple post-hoc test (Tukey test) was performed to detect any significant difference between the level of pesticide use and height of grass cover.

3. Results

3.1. Predators of codling moth larvae

A total of 42 codling moth larvae were video recorded of which 25 were consumed (59.52 %).

Seven taxa attacking the larvae were identified by the video recording: Opiliones had the higher number of attacks (56 attacks), then Coleoptera (14 attacks), Formicidae (12 attacks), Gastropoda (11 attacks), Dermaptera (10 attacks), Isopoda (6 attacks), and Araneae (3 attacks) (Table 10).

Predators	Attack	Successful attacks		Efficiency	Dead time of larvae		
	#	#	% a	% b	Median	Min	Max
Opiliones	56	11	19.64	44	51.85	17.54	163.07
Coleoptera	14	4	28.57	16	55.37	4.1	158.86
Formicidae	12	3	25.00	12	67.02	66.85	68.85
Dermaptera	10	5	50.00	20	75.76	48.3	95.15
Gastropoda	11	0	0.00	0	-	-	-
Araneae	3	1	33.33	4	33.45	-	-
Isopoda	6	0	0.00	0	-	-	-

Table 10. Number of attack, successful, efficiency, and dead time of pinned larvae by seven taxon

Five attacks by earwings (Dermaptera : Forficulidae; 4 by *Labidura spp* and 1 by *Forficula auricularia*), 4 by ground beetles (Coleoptera : Carabidae; *Pseudophonus rufipes*, *Poecilus cupreus*, *Anchomenus dorsalis*, one Harpalinae), 1 by spider (Araneae : Trochose) and 11 by harvestmen (Opiliones : Phalangidae, *Phalangium opilio*) led to the death of the larvae (50%, 28.57%, 33.33%, 25%, 19.64% of successful attacks respectively). Gastropoda and Isopoda had no successful attack.

Concerning the efficiency of the predator, Opiliones had the best efficiency (44% of larvae killed by Opiliones), then Coleoptera and Dermaptera (20% each), Formicidae (12%), and finally Araneae (4%).

The time of death of the larvae was the lowest for Araneae (33.35 min), then Coleoptera (66.31 with a range between 4.1 and 158.86), Opiliones (66.94 with a range between 17.54 and 163.07), Formicidae (67.52 with a range between 66.85 and 68.85) and Dermaptera (78 with a range between 43.8 and 95.5).

Some Carabidae in the pitfall traps could predated the larvae according their functional traits but were not observed by the video recording (Table 11).

Species	Activity	Size (mm)	Diet
<i>Amara aenea</i> G.	Diurnal	6.0-8.5	Granivorous (zoophagous)
<i>Anchomenus dorsalis</i> P.	Nocturnal	5.6-7.7	Zoophagous
<i>Brachinus crepitans</i> L.	?	7.0-10	Zoophagous
<i>Calathus fuscipes</i> G.	Nocturnal	10.0-11.9	Zoophagous
<i>Carabus violaceus purpurascens</i> F.	Nocturnal	20-34	Zoophagous
<i>Carterus fulvipes</i> L.	?	6.0-10.0	Granivorous
<i>Cylindera germanica</i> L.	Diurnal	8.0-11.0	Zoophagous
<i>Diachromus germanicus</i> L.	?	8.0-10.0	Granivorous
<i>Harpalus affinis</i> S.	Nocturnal	8.1-12.4	Granivorous-zoophagous
<i>Harpalus distinguendus</i> D.	?	7.9-11.2	Granivorous-zoophagous
<i>Metallina properans</i> S.	Diurnal	2.7-4.1	Zoophagous-granivorous
<i>Ophonus azureus</i> F.	?	7.0-9.0	Granivorous (zoophagous)
<i>Ophonus opacus</i> D.	?	12.0-14.0	?
<i>Ophonus subquadratus</i> D.	?	6.5-8.5	?
<i>Parophonus mendax</i> PR.	?	7.0-8.0	?
<i>Poecilus cupreus</i> L.	Diurnal	9.6-14.0	Zoophagous-granivorous
<i>Pseudoophonus rufipes</i> (De Geer)	Nocturnal	10.2-16.1	Granivorous-zoophagous
<i>Pseudoophonus griseus</i> P.	?	9.0-11.0	Granivorous-zoophagous
<i>Pterostichus melanarius</i> L.	Both	15-18	Zoophagous
<i>Pterostichus niger</i> S.	Nocturnal	15.2-21.6	Zoophagous

Table 11. Carabidae in the pitfall trap and the three functional traits. The species observed by the video recording was in bold.

3.2. Decreased pesticide use promotes the predation rate of codling moth larvae.

Organic and Low input management had a significantly higher rate of predation of codling moth larvae (0.54 ± 0.07 and 0.46 ± 0.08 respectively) than Conventional management (0.13 ± 0.06) ($p < 0.01$) (Fig. 28)

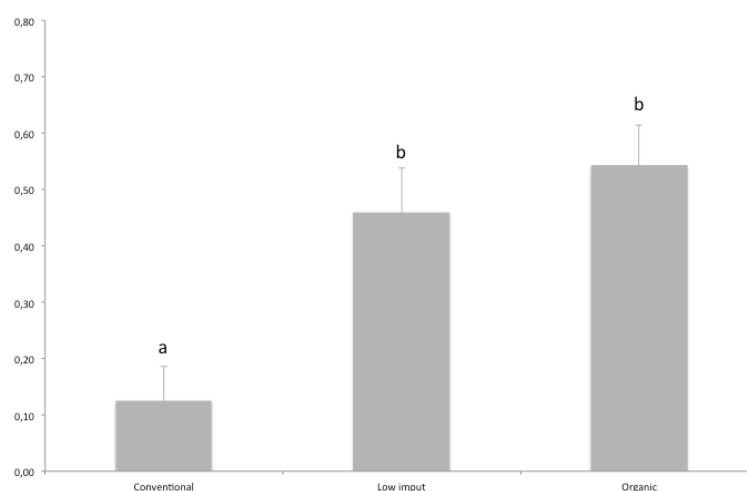


Figure 28. Predation rate of pinned codling moth larvae according to the pesticide use modalities

Opiliones per observation (mean \pm SE) were significantly more abundant in Organic and Low input (1.41 ± 0.29 and 1.12 ± 0.28 respectively) than in Conventional management (0.21 ± 0.10) ($p < 0.01$). The other predators were low in abundance (Carabidae) or absent (Forficulidea and Aranea) and not significantly different between the pesticide use modalities (Table 12).

Pesticide use	Conventional	Low input	Organic
Coleoptera	0.04 ± 0.04	0.25 ± 0.12	0.08 ± 0.06
Opiliones	0.21 ± 0.10 (a)	1.12 ± 0.28 (b)	1.41 ± 0.29 (b)
Dermaptera	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Aranae	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0

Table 12. Abundance of predators per human observation according to pesticide use modalities

3.3. Increased grass cover height in the alley does not promote the predation rate of codling moth larvae.

The rate of predation of codling moth larvae tended to be higher in small grass cover than in other modalities although not significantly (0.41 ± 0.05 , 0.40 ± 0.05 and 0.49 ± 0.05 for Tall, Medium, Short ground cover respectively)($p>5\%$) (Fig 29).

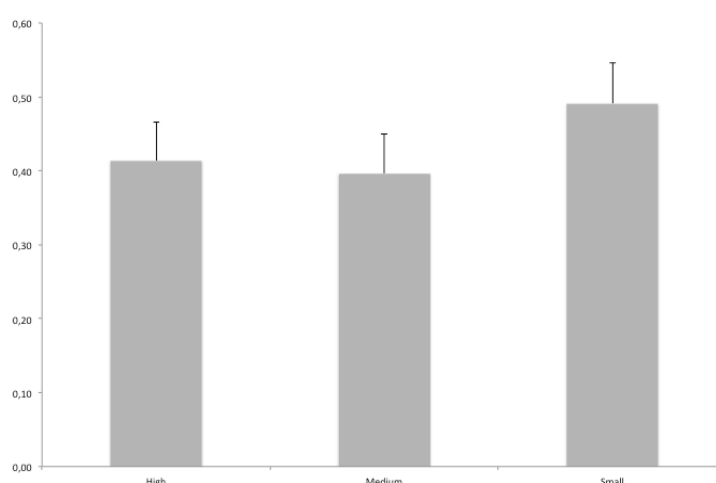


Figure 29. Predation rate of pinned codling moth larvae according to the grass cover height modalities

Opiliones tended to be more abundant in Short grass cover (0.64 ± 0.10) than in the Medium and Tall ground cover (0.45 ± 0.13 , 0.48 ± 0.10 for Tall, Medium ground cover respectively) although not significantly. The other predators (Coleoptera, Forficulidae, Araneae) were scarce and their abundances were not significantly different between the different grass cover modalities (Table 13). 8 Silphidae were observed to eat larvae by human observation.

Height of grass cover	High	Medium	Small
Coleoptera	0.24 ± 0.07	0.21 ± 0.06	0.36 ± 0.10
Opiliones	0.45 ± 0.13	0.48 ± 0.10	0.64 ± 0.10
Dermaptera	0.14 ± 0.05	0.08 ± 0.04	0.21 ± 0.08
Araneae	0.09 ± 0.04	0.03 ± 0.02	0.12 ± 0.04

Table 13. Abundance of predators per human observation according to the grass cover height modalities

4. Discussion

4.1. What are the predators of the codling moth larvae?

We identified Opiliones (i.e., *Phalangium opilo*) as a predator of codling moth larvae by video recording. They were the most active (56 attacks) and an efficiency predator (19.64% of successful attacks and kill 44% of the larvae predated). Up to now, they had not been identified as a predator of codling moth larvae. While Opiliones represent 8% of the ground-dwelling generalist predators sampled by pitfall in US apple orchards, Matthews et al. (2004) did not considered them as potential predator of codling moth larvae. However, in vineyards, Frank et al. (2007) recorded 7% of successful attack of larvae of *Epiphyas postvittana* (Lepidoptera) by Opiliones and on 7 attacked larvae, 1 was killed by Opiliones. Furthermore, it was identified like a potential predator of soft body prey (Halaj and Cady 2000), of Lepidoptera larvae in forest (i.e., *Panolis flammea*, (Hicks et al. 2003)) and in agricultural system (i.e., *Pieris rapae*, (Ashby 1974)). It can be noticed that the codling moth larvae leaves the apple to join the soil for hibernation during the night (Balachowsky 1966), which coincides with the nocturnal activity of Opiliones.

In your study, Araneae were not identified as “efficient” predators, only one Trochose was video taped in act of attacking codling moth larvae. This is not in agreement with another study that identified spiders (i.e Lycosidae) as potential good predators of codling moth larvae on the ground early in the season (Boreau de Roince et al. 2012). This could be due to the presence of alternative and/or more attractive prey in the ground cover (e.g. natural codling moth larvae).

Ground beetles, which have already been identified by several studies as predators of fifth instar of codling moth (Boreau de Roince et al. 2012; Glen and Milsom 1978; Mathews et al. 2004; Riddick and Mills 1994) were also video recorded as predator. Even if only 14 attacks were observed, 35.07 lead to the death of the larvae. This confirms their potential role of predator in apple orchards. This role could be more important late in the season during the peak of Carabidea abundance. Further investigation could enhance the population of Carabidae and particular species with functional traits interesting to the larvae predation.

Forficulidae attacked few the larvae but in 50% of the cases their attack led to the death of the larvae. *F. auricularia* in summer should be in the tree (Romeu-Dalmau et al. 2012; Simon et al. 2011) and so be low abundance in the soil. This fact could be explain the low tend of attacks.

In our system, Formicidae were not considered as successful predators. They attack in large groups (Frank et al. 2007) and then could not be very efficient against natural larvae which could exhibit their full repertory of defensive behaviors such as the ability to escape by contrast with pinned larvae.

Some attacks did not lead to the death of the larvae; the larvae could still perform the thrashing defensive behavior, even if they were pinned. This behavior was observed in video recordings to successfully drive off predator on many occasion and accounts for the low percentage of successful attacks by predators. Moreover, the predators could not take away the larvae and had to eat on the card. This contributed to the low percentage of successful attacks and to the long time of death of the larvae. Furthermore, even if the attacks by the predator did not result in the death of the larvae, the injury could be the entry point to the development of fungi (as *Verticillium lecanii*) (Glen and Milsom 1978). Fungi are able to stop the development of the larvae. Hurt larvae could attract scavenger predators.

4.2. Impact of orchard management

In the two situations, few predators were observed directly feeding by human observation, which confirm the perturbation underlined by Mathews et al. (2004). However, Opiliones were observed to feeding on codling moth larvae in the two study cases, which confirms their predator role identified by video.

The rate of predation of codling moth larvae and the abundance of Opiliones feeding were higher in Organic and Low input than in Conventional crop protection management. The Opiliones are known to be affected by pesticide use. Studies have show that Opiliones abundance was higher in Integrated than in Conventional management (Epstein et al. 2001) and higher in the Organic than in Conventional (Drummond et al. 2010).

The predation of codling moth larvae and the Opiliones abundance were higher but not significantly different (as observed by Horton et al. (2003) by pitfall sampling) in Short than in Tall and Medium grass covers. In the Tall and Medium modalities the resource (prey and detritus) could be higher than in the short modality, which could lead to a decrease of predation of the target prey, based on Mathews et al. (2004) who observed that the predation of codling moth larvae was higher in a herbicid treatment where the complexity (resource and structure) of the habitat was low than in mulch treatment. An alternative hypothesis is that the foraging area to localize preys would be wider in the Tall modality so that predation efficacy would decrease (Langellotto and Denno 2004).

Discussion générale et conclusions

Discussion générale

Une image simplifiée de la relation entre pratiques agricoles, ennemis naturels, prédation et régulation est souvent considérée : les pratiques ont un impact sur les ennemis naturels, et donc sur les ennemis naturels assurant un service écosystémique (Fig. 30). Ainsi, si on met en place des pratiques ou aménagements favorisant les auxiliaires, on augmente automatiquement le contrôle naturel.



Figure 30. Représentation simplifiée de la relation entre pratiques agricoles, ennemis naturels et prédation.

Cependant, cette simple relation cache un système bien plus complexe, à la fois en ce qui concerne chaque compartiment de la relation (pratiques, ennemis naturels et service écosystémique) que les relations entre compartiments. Les différents chapitres de la thèse illustrent cette complexité. En reprenant chacun des grands thèmes de cette thèse : la diversité des pratiques en agriculture biologique, les ennemis naturels, la fonction de prédation, nous allons illustrer cette complexité par rapport aux résultats obtenus pour ensuite proposer des perspectives à ce travail.

1. La diversité des pratiques en AB

Les études s'intéressant au lien entre pratiques agricoles et ennemis naturels peuvent être classées selon deux catégories : celles considérant la simple dichotomie agriculture conventionnelle v.s. agriculture biologique (Bengtsson et al. 2005; Hole et al. 2005) et celle allant plus loin en considérant la combinaison des pratiques mises en place quel que soit le mode de production, conventionnel ou biologique. Cependant, avec cette dernière approche, certaines pratiques sont exclusivement utilisées dans un des modes de production, c'est par exemple le cas des herbicides. Ces pratiques

conduisent de fait les différents auteurs à regrouper les producteurs selon la classique dichotomie entre agriculture conventionnelle et agriculture biologique (Puech et al. 2014; Vasseur et al. 2013). Cette forte séparation entre les deux modes de production passe sous silence la diversité des pratiques mises en place dans chaque mode de protection. Lors des entretiens avec les techniciens - qui possèdent une vision exhaustive des pratiques mises en place dans la zone d'étude - la mise en évidence d'une diversité des stratégies de protection au sein du mode AB leur paraissait un pari fort. Or, dans le Chapitre 1 en s'intéressant seulement au mode de protection AB, quatre stratégies de protection ont pu être mises en évidence du point de vue de la gestion des bioagresseurs. **Le fait de considérer l'AB comme un système unique et homogène semble donc réducteur en vue de ces résultats.**

La description des stratégies de protection par les pratiques mises en place par le producteur permet de mettre en évidence plusieurs voies d'intensification (Chapitre 1). La stratégie de « Substitution » illustre l'intensification au sens classique du terme (utilisation plus importante d'intrants), elle correspond à la stratégie de Substitution décrite par certains auteurs (Penvern et al. 2009 ; Lamine 2010). Les producteurs appliquent de façon minimaliste le cahier des charges en AB, en substituant les produits utilisés en agriculture conventionnelle par des produits autorisés en AB et tendent vers une conventionnalisation du système. Au sein de cette stratégie, l'application des principes qui définissent l'AB (principe de Santé, d'Ecologie, d'Equité et de Précaution) semble minimaliste.

A l'inverse, la stratégie que nous avons appelé « Ecologiquement intensive » illustre le concept d'intensification écologique. Les producteurs mettent en place des pratiques favorisant les ennemis naturels comme l'utilisation de pesticides peu toxiques (la non-utilisation du spinosad), une gestion de l'enherbement. Cette stratégie rappelle la stratégie de re-conception décrite par certains auteurs (Penvern et al. 2009 ; Lamine 2010). Au sein de cette stratégie, l'application des principes de l'AB semble maximisée et notamment le principe d'Ecologie.

Une autre intensification est observée, il s'agit d'une « intensification technologique » rendue évidente dans notre cas par l'adoption d'une pratique innovante les filets Alt'Carpo. Face au faible nombre de solutions disponibles pour les producteurs et les impasses techniques dans lesquelles ils se trouvent (développement

de résistance (PURE 2013)), la démonstration de l'efficacité de cette technique via un réseau de producteurs depuis 2005 et un projet scientifique récent ont permis son développement chez les producteurs, malgré le fort investissement financier que cela peut représenter (environ 6000 €/ha). Cette technique pourrait continuer à se diffuser au sein du mode de production de l'AB dans le futur, ce qui entraînerait une homogénéisation du mode de production AB. **La diversité des formes d'AB attendues (Substitution vs reconception) est alors enrichie par l'introduction d'une technique innovante. Cette dernière pourra venir modifier le paysage AB et l'homogénéiser.**

Il est important de noter que les pratiques caractérisant une stratégie de protection ne sont pas exclusives à cette stratégie. En effet, la dispersion des points de l'ACM sur les pratiques mises en place en AB (Chapitre 1) témoigne de la variabilité qui peut être présente au sein d'une même stratégie de protection. Certains producteurs associent par exemple l'utilisation du filet avec l'application du virus de la granulose ou du spinosad. Le traitement insecticide AB est alors décrit comme un traitement d'assurance par les producteurs suite à une fermeture tardive ou à une ouverture précoce des filets Alt'Carpo alors que les populations de carpocapse étaient présentes.

Le nombre de producteurs enquêtés ne permet pas une généralisation immédiate de ces résultats. Cependant, **ces résultats restent valables dans notre zone d'étude** (Sud-Est de la France). Étendre l'échantillon, en contrastant les contextes géographiques avec des pressions sanitaires et donc des pratiques différentes, permettrait de valider ou d'infirmer ces résultats. La mise en place d'un observatoire national des pratiques permettrait de répondre à ces exigences. La caractérisation des pratiques pourrait être faite de manière plus fine afin de mieux comprendre l'impact de ces pratiques sur les ennemis naturels. Dans le chapitre 3, nous avons suggéré que la date de tonte pouvait être importante dans la gestion du couvert. Ainsi, à l'image des calendriers de traitements obtenus pour l'application des pesticides AB, un calendrier des opérations culturales (taille, tonte, fertilisation) et de conditions d'application (date, dose, matériel, applicateur) pourrait être renseigné.

De plus, la mise en place d'un tel observatoire permettrait aux producteurs d'avoir une vision des pratiques mises en place dans leur zone de production et de se positionner par rapport à celles-ci. En effet, lors de la restitution auprès de chaque producteur des différentes pratiques et stratégies mises en place dans leur zone d'étude ainsi que les résultats de suivis de biodiversité fonctionnelle et de prédation, les producteurs ont montré un intérêt pour les différents résultats de leur exploitation mais aussi par les résultats montrant le panorama de ce qui se passait sur la zone. C'est une occasion pour eux d'avoir connaissance de pratiques innovantes et/ou alternatives déjà mises en place sur des exploitations voisines et de leurs conséquences. Le réseau DEPHY : Démonstration Expérimentation Production de référence sur les systèmes économes en pHYtositaire, dans le cadre du plan Ecophyto 2018, tente de répondre à ces attentes. Il est composé de fermes pilotes et a pour but de diffuser des pratiques permettant la réduction des produits phytosanitaires.

Notre échantillonnage des producteurs ne permet pas de mettre en évidence **les facteurs influençant l'adoption des pratiques** (Lohr and Park 2002). Cependant, Lohr et Park (2002) à partir d'une enquête nationale auprès de 1027 maraichers ont mis en évidence que la surface cultivée en maraichage, le niveau d'éducation, l'expérience en agriculture biologique influençaient l'intensité d'adoption des pratiques de gestion des ravageurs en AB (nombre de pratiques mises en place). Notre échantillon ne contient pas un effectif suffisant de producteurs avec des situations contrastées pour mettre en évidence ce type de résultat.

Une des perspectives ouverte par ce travail serait de mener ce type d'étude en prenant comme modèle d'autres cultures en agriculture biologique. Les cultures annuelles pourraient être un bon modèle, elles mobilisent en effet d'autres leviers pour gérer les bioagresseurs : la rotation des cultures, les variétés résistantes pouvant être implémentées d'année en année. Cependant, la marge de manœuvre est faible pour diminuer l'utilisation des produits phytosanitaires, déjà faible (IFT de 2,5, AGRESTE, 2014). Le maraichage avec des IFT élevés représenterait un cas d'étude intéressant pour étudier la diversité des stratégies de protection mises en place en AB. À la vue de la diversité des pratiques qui peuvent être mises en place pour diminuer

l'utilisation de pesticides en culture légumière (Barriere et al. 2014), on peut supposer que les maraichers mobilisent différentes pratiques et combinaisons de pratiques pour gérer les bioagresseurs. Bien que présentant des caractéristiques différentes, des parallèles pourraient être faits entre le système maraicher et le système arboricole, les stratégies décrites dans notre cas d'études pouvant trouver leur homonyme en maraichage :

- La stratégie « technologiquement intensive » avec la mise en place par les producteurs de filets insect-proof pour empêcher la colonisation des cultures par les ravageurs.
- La stratégie de « substitution » avec l'utilisation de produits de traitements autorisés en AB et une rotation des cultures présentant une faible diversification.
- La stratégie « écologiquement intensive » avec une forte diversification des rotations et aménagement de l'habitat en introduisant des plantes riches en nectar ou pollen pour favoriser les ennemis naturels.
- La stratégie « intégrée » avec la mise en place d'une large gamme de pratiques dans le but de contrôler les bioagresseurs : gestion de la fertilisation, gestion de l'habitat.

Une autre stratégie pourrait être mise en évidence en maraichage. Du fait de l'utilisation de tunnels, un environnement semi-confiné est créé, ce qui rend les lâchers d'ennemis naturels potentiellement plus efficaces qu'en arboriculture. Une stratégie de protection pourrait être basée sur de la lutte par inondation.

D'un point de vue appliqué cela montre que malgré l'impasse technique actuelle à laquelle font face les producteurs en vergers de pommiers, diverses solutions s'offrent à eux. Il serait intéressant de coupler cette analyse avec une analyse économique pour évaluer le coût de mise en place de ces différentes stratégies.

Une étude visant à présenter ces stratégies aux producteurs puis de co-construire de nouveaux scénarii afin d'identifier quelles sont les pratiques qu'ils pensent pouvoir mettre en place sur leur exploitation pourrait faire ou non évoluer leur système (Le Bellec et al. 2011). Une modélisation d'accompagnement de type COMOD pourrait par exemple être envisagée : un groupe de producteurs et de

techniciens pourraient être réunis afin d'identifier les pratiques qu'ils pourraient modifier ou mettre en place sur l'exploitation.

2. Les communautés d'ennemis naturels

Une stratégie de protection est composée d'un ensemble de pratiques (et d'interactions entre pratiques). Une pratique donnée peut avoir un effet différent selon le taxon pris en compte. Deux pratiques utilisées au sein d'une même stratégie peuvent avoir des effets inverses sur un ennemi naturel donné. De plus, des interactions entre ennemis naturels sont possibles. Du fait de ces nombreuses interactions, la mise en évidence de communautés d'ennemis naturels caractéristiques d'une stratégie de protection n'est pas évident *a priori*.

Malgré cela, nous avons pu mettre en évidence **en vergers de pommier en AB, des communautés d'ennemis naturels différentes selon les stratégies de protection précédemment définies**. Certaines espèces de prédateurs constituent potentiellement des espèces bio-indicatrices : *F. pubescens* est par exemple présente en abondance dans les vergers peu traités (la stratégie « écologiquement intensive » du Chapitre 1, aux vergers en Biodynamie du chapitre 2 et les vergers expérimentaux « bas intrant » du chapitre 3). *F. pubescens* est une espèce de forficule très sensible aux pesticides (Malagnoux 2014). A l'inverse, les Miturgidae sont présentes dans des vergers soumis à une plus forte pression phytosanitaire. Elles sont en effet capables de s'installer dans des milieux perturbés et présentant une communauté d'arthropodes avec une faible richesse spécifique (Hogg et al. 2010).

A la suite de ce travail, une hiérarchisation des pratiques en AB influençant les prédateurs généralistes pourrait être menée et étendue à des ennemis naturels spécialistes comme les parasitoïdes. Cela pourrait conduire à la création de nouvelles stratégies de protection qui pourraient être testées par modélisation ou expérimentalement.

Cependant on remarque aussi que **les communautés d'ennemis naturels sont très variables en termes d'abondance et/ou d'équitabilité des communautés** (Chapitre 1 à 3, Fig. 31).

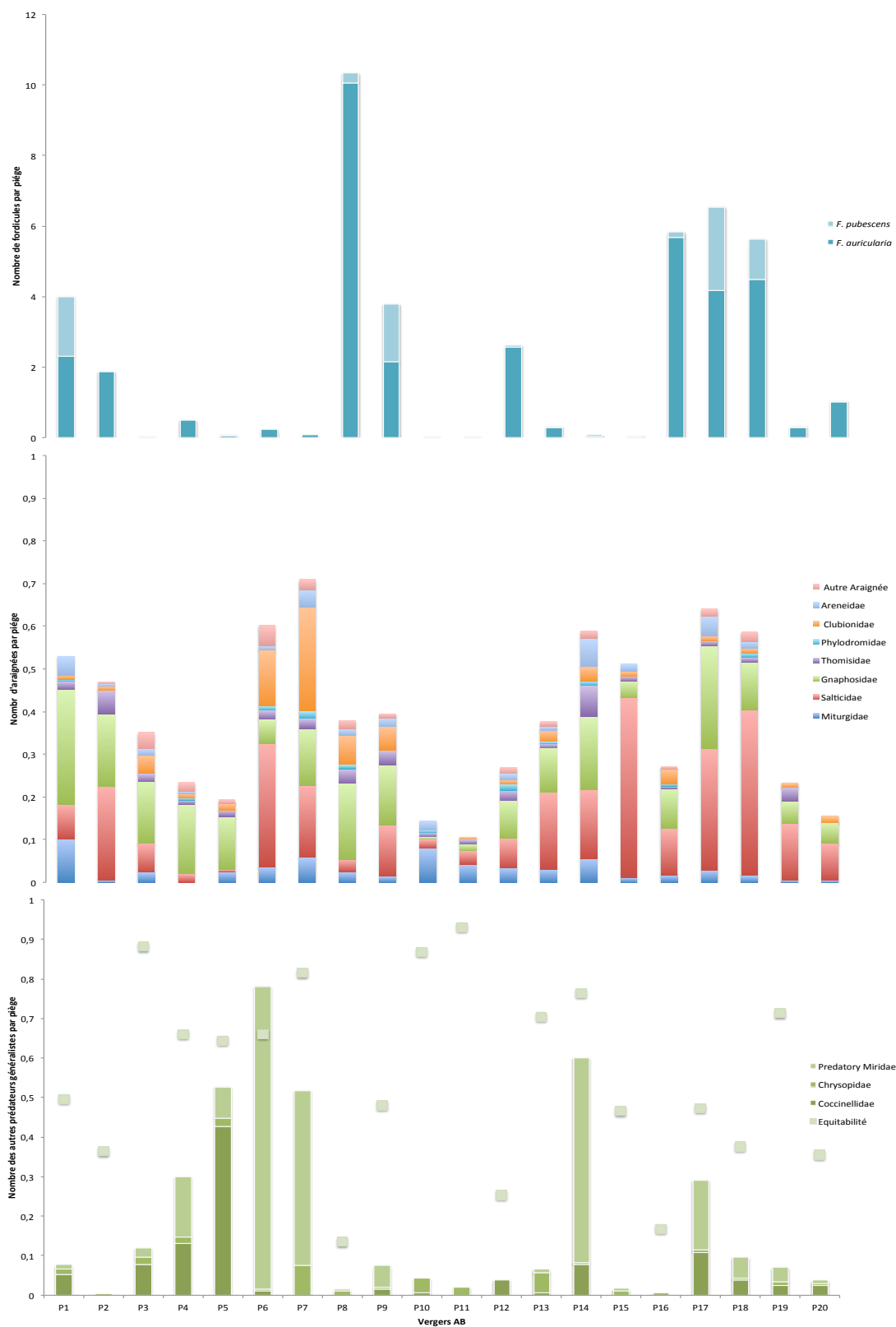


Figure 31 : Abondance des prédateurs généralistes par pièges dans les 20 vergers en AB

Certains vergers ont des abondances très faibles (qui peuvent alors être proches de celles retrouvées dans des vergers en agriculture conventionnelle, (Sauphanor et al. 2009)) alors que d'autres ont des abondances élevées. Ces forts coefficients de variation peuvent expliquer que certaines études comparant l'agriculture conventionnelle et AB ne détectent pas d'effet ou un effet négatif de l'AB sur les communautés d'arthropodes (Bengtsson et al. 2005; Hole et al. 2005). Selon le règlement Européen EU 2009, l'agriculture conventionnelle devrait répondre aux normes de l'agriculture intégrée, ce qui potentiellement risque de renforcer ce constat. Cette dernière est basée sur trois principes : utiliser des mesures qui limitent le développement des organismes nuisibles, la considération de toutes les méthodes disponibles pour la protection des plantes et leur utilisation à des niveaux qui sont économiquement et écologiquement justifiées. Cela dans le but de limiter l'impact sur l'agroécosystème et donc potentiellement sur les ennemis naturels. La frontière entre les deux modes de production deviendra de fait de plus en plus fine à l'exception de certains pesticides qui resteront interdits en AB. Cependant, l'agriculture intégrée n'est pas encore adoptée par tous les producteurs (Lefebvre et al. 2014).

Plusieurs hypothèses peuvent être mises en avant pour expliquer cette variabilité.

Les communautés d'ennemis naturels sont influencées par les processus de colonisation des vergers par les différentes espèces. On remarque que les communautés peuvent être dominées par une espèce (Fig. 31) : c'est le cas du verger P6 qui est dominé par une punaise prédatrice ou le P8 par *F. auricularia*. Ce qui se traduit par une variabilité de l'indice d'équitabilité (entre 0.14 et 0.92). L'espèce dominante a pu coloniser le milieu en premier et occuper la niche écologique laissant ensuite peu de place en terme d'habitats et de ressources aux autres espèces, c'est l'hypothèse de la « préemption de niche » (He and Tang, 2008). L'espèce dominante peut aussi présenter des traits écologiques qui lui confèrent une meilleure résistance aux perturbations comme la tolérance ou le développement de résistances aux pesticides, une meilleure capacité de recolonisation du milieu (comme les Miturgidae).

Les communautés d'ennemis naturels sont influencées par les interactions entre espèces. Au sein d'une communauté, différentes interactions peuvent avoir lieu entre les espèces, il peut s'agir de phénomène de facilitation ou de prédation intragilde. Dans le cas de phénomène de facilitation, la présence d'une espèce favorise la présence d'une autre espèce (Stachowicz 2001). Les phénomènes de prédation intragilde sont bien connus dans les communautés d'ennemis naturels en contexte agricole (Finke and Denno 2003).

Une des caractéristiques intéressante dans l'étude des prédateurs généralistes pour le contrôle biologique est leur capacité à consommer *une gamme de proie plus ou moins large selon leur degré de polyphagie*. En effet, la mise en place de pratiques favorisant la présence de ressources alternatives peut permettre d'augmenter les populations d'ennemis naturels. On a vu dans le chapitre 3, que *F. pubescens* hautement polyphage était favorisé par une hauteur d'enherbement importante où l'on trouve plus de ressources et notamment du séneçon sur lequel il se nourrit. A l'inverse, les populations peu polyphages sont corrélées à la présence d'un type de ressource. Ainsi dans le chapitre 1, nous avons pu voir que les populations de coccinelles (peu polyphage) étaient fortement corrélées avec l'infestation en puceron cendré.

Une stratégie de protection est composée d'un ensemble de pratiques ayant un impact sur les ennemis naturels, *mais des interactions entre pratiques existent aussi* (Doré et al. 2011) et peuvent impacter la communauté d'ennemis. Il est cependant difficile d'identifier et de maîtriser ces interactions dans un système de culture. Par exemple, on peut supposer qu'il existe une interaction entre la mise en place d'un couvert végétal et l'application de pesticide. Dans le chapitre 3, nous avons vu qu'un enherbement haut avait pour conséquence une augmentation des *F. pubescens* dans l'arbre, les autres ennemis naturels n'étant pas impactés par cette modification de la hauteur du couvert végétal. Cependant, nous avons travaillé sur un verger à faibles intrants (un traitement phytosanitaire sur la saison). Si l'on modifiait la hauteur du couvert végétal dans un verger commercial (où il y a de nombreuses interactions entre pratiques), des conclusions différentes pourraient être tirées : *F. pubescens* est très sensible aux pesticides (Malagnoux, 2014), ils sont très peu présents dans les vergers

traités (même en AB), modifier la hauteur de l'enherbement ne permettra pas de modifier l'abondance de *F. pubescens* dans l'arbre. A l'inverse d'autres espèces moins sensibles aux pesticides et possédant une forte capacité de dispersion comme *Cheiracanthium mildei* pourraient être favorisées par ce type d'aménagement en vergers à vocation commerciale

Les communautés d'ennemis naturels peuvent être influencées par la structure de la couronne. Une augmentation de la complexité architecturale peut avoir comme conséquence une augmentation des ennemis naturels (Langellotto and Denno 2004). Cependant dans notre échantillon, la taille de l'arbre qui permet de jouer sur la complexité de la couronne est pensée de façon à optimiser la maturation et la qualité des fruits, la complexité est plutôt faible et peu variable pour l'ensemble de nos parcelles (caractérisation à dire d'expert).

Les communautés d'ennemis naturels peuvent être influencées par le paysage. Certaines études mettent en avant le rôle de paysage dans la composition des communautés, la complexité du paysage affecte la richesse spécifique et l'abondance des ennemis naturels (Bianchi et al. 2006; Chaplin - Kramer et al. 2011). Cependant, les études sur l'effet du paysage se sont souvent intéressées à des cultures annuelles, les ennemis naturels trouvent alors dans le paysage un refuge, un lieu d'hivernation et d'alimentation lorsque la culture n'est plus présente. L'impact du paysage sur des cultures pérennes où un habitat est présent toute l'année pourrait être différent. Cela ouvre une perspective de recherche : comprendre et quantifier l'impact du paysage et de son organisation sur les communautés d'ennemis naturels en culture pérenne.

A travers ces hypothèses, on voit que les communautés d'ennemis naturels sont influencées par divers facteurs dont il serait intéressant de quantifier l'impact de chacun d'entre eux et d'identifier ou non les leviers mobilisables pour optimiser la présence d'ennemis naturels.

Il est important de noter que nous ne possédons qu'une image partielle de la communauté des prédateurs, il n'existe en effet pas de méthode d'échantillonnage exhaustive. Chaque méthode d'échantillonnage possédant ses avantages et ses limites.

La méthode des bandes pièges a été utilisée au cours de la thèse car elle est mise en place sur plusieurs jours ce qui permet d'éviter des biais de piégeage liés à l'heure d'échantillonnage ou aux conditions climatiques. De plus, cette méthode est peu impactée par le manipulateur contrairement à la méthode de frappage, une des méthodes souvent utilisées dans les études en verger (Horton et al. 2003; Miliczky and Horton 2005; Simon et al. 2007). Celle-ci consiste à frapper des rameaux de l'arbre au dessus d'un entonnoir afin de récupérer les arthropodes (FAUVEL et al. 1981). Cette technique est fortement dépendante de l'heure de la journée à laquelle elle est mise en place, du manipulateur (force des coups), et de l'arbre (taux de ramification). Cependant, avec la méthode des bandes pièges, un biais d'estimation des prédateurs peut être observé pour certains taxons : le forficule est surestimé puisqu'il possède une phéromone d'agrégation (Lordan et al. 2014; Sauphanor and Sureau 1993), les organismes volants ne sont pas capturés de manière efficace de cette façon.

Il serait intéressant d'un point de vue méthodologique de développer une méthode d'estimation des ennemis naturels présents dans la couronne des arbres sans décimer les populations.

3. La prédation

Une simple estimation de la communauté d'ennemis naturels n'est pas suffisante pour estimer la fonction rendue par celle-ci. Le lien entre ennemis naturels et contrôle biologique n'est en effet pas univoque (Straub et al. 2008). Une solution est d'estimer la fonction rendue les ennemis naturels : la prédation des œufs de carpocapse dans le chapitre 2 et 3 et la prédation des larves dans le chapitre 4.

Le taux de prédation des œufs de carpocapse augmente au cours de la saison : il est faible en début de saison (avril) et augmente tout au long de la saison pour être à son maximum en août. Monteiro et al. (2013) avait déjà observé une augmentation du taux de prédation des œufs de carpocapse en vergers de pommiers entre juin et août. Ici, la dynamique temporelle est affinée sur toute la durée de présence naturelle des œufs des trois générations de carpocapse. Bien que le taux de

prédation augmente en cours de saison, il serait préférable pour les producteurs que le taux de prédation soit fort en début de saison pour limiter les dégâts sur les fruits et la population pour la génération $n+1$. Les futures études pourront se concentrer sur cette tâche afin de fournir aux producteurs des solutions pour optimiser le contrôle biologique de ce ravageur. L'augmentation de la hauteur du couvert végétal n'a pas permis la mise en place plus précoce d'une communauté d'ennemis naturels et donc à augmenter ce taux (Chapitre 3). Elle a au contraire diminué le taux de prédation lorsque celui-ci est le plus important supposant une perturbation liée à présence de ressources alternatives. Une des perspectives de recherche serait d'agir sur la date de tonte. L'enherbement pourrait ne pas être tondu en début de saison pour permettre la mise en place et le maintien des ennemis naturels, puis serait coupé en milieu de saison (juin) afin de limiter les perturbations liées aux ressources alternatives (dilution de la ressource cible) et potentiellement provoquer un mouvement des ennemis naturels entre la strate herbacée et le couvert végétal (Altieri and Schmidt 1986). Cependant, les résultats du chapitre 3 ne remettent pas en cause la mise en place d'un couvert végétal dans les vergers puisque d'autres fonctions sont rendues par ce couvert : limiter l'érosion, la dérive des pesticides et les possibles effets positifs sur le parasitisme.

Le taux de prédation varie en fonction des stratégies de protection et des vergers (Chapitre 2, 3 Fig. 32).

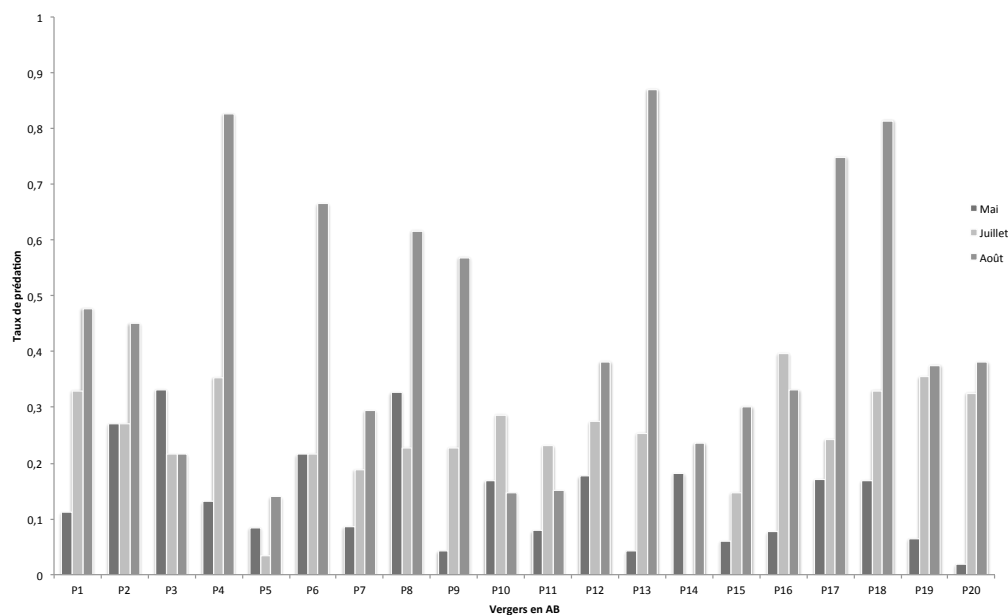


Figure 32 : Taux de prédation des oeufs de carpocapse dans les 20 vergers en AB aux 3 dates

Monteiro et al. (2013) avaient déjà observé cette variation entre les vergers et supposé que cela était dû aux pratiques mises en place. On voit grâce aux résultats des Chapitre 2 et 3, qu'il est important de suivre la prédation dans le temps, l'impact d'une stratégie ou d'une pratique pouvant être différent selon la période considérée.

La prédation résulte de la consommation de la ressource par les prédateurs. **Un lien existe donc entre les prédateurs généralistes et la prédation.** Cependant, **ce lien est complexe**, ce qui peut expliquer la variation du taux de prédation au cours du temps et entre les vergers en AB.

La présence de *ressources alternatives* peut venir modifier le comportement des prédateurs généralistes (Chapitre 2, 2b, 3). Plus un prédateur généraliste est polyphage, plus la présence de ressources alternatives représentent une distraction pour le prédateur et diminuent ainsi son efficacité envers la ressource cible. La ressource cible est en effet « diluée » parmi les autres ressources.

La *structure de l'habitat* peut aussi modifier le comportement du prédateur. En augmentant la complexité de l'habitat, le prédateur pourra avoir un temps de parcours plus long pour atteindre les proies. Legrand and Barbosa (2003) ont par exemple montré qu'augmenter la complexité morphologique des plantes de pois diminuait l'efficacité de *Coccinella septempunctata* avec une mortalité des pucerons plus faible. C'est une des hypothèses avancées dans le chapitre 3 pour expliquer le plus faible taux de prédation lorsque l'enherbement est important au mois de juillet. En effet, au mois de juillet il y a un enchevêtrement entre le couvert végétal et la couronne, les prédateurs vont alors avoir plus de chemin à parcourir pour arriver à la ressource cible. De plus, cette complexité du milieu peut aussi diminuer l'efficacité de nos pièges, dans un milieu complexe, la probabilité de rencontre des pièges par les ennemis naturels est diminuée.

Des *interactions entre prédateurs* peuvent aussi impacter la prédation de la ressource cible : il peut s'agir d'une facilitation ou d'une interférence. Le phénomène de facilitation de consommation a par exemple été mis en évidence par Losey and Denno (1998). Ils ont montré que le taux de prédation des pucerons par l'action combinée d'une coccinelle et d'un carabe correspondait au double de la somme des taux prédation de chaque prédateur.

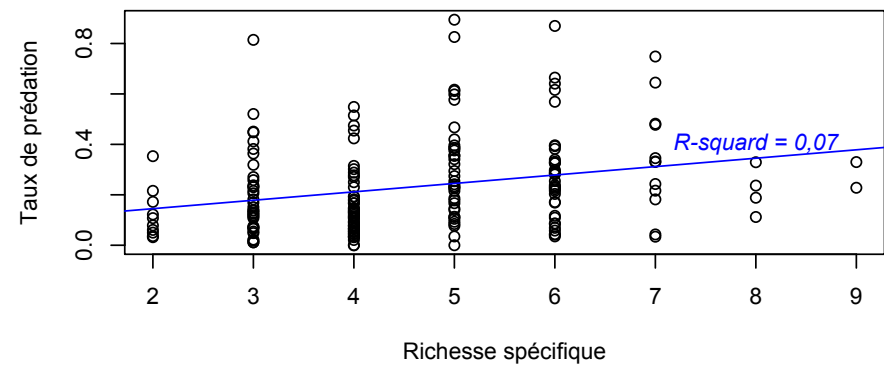
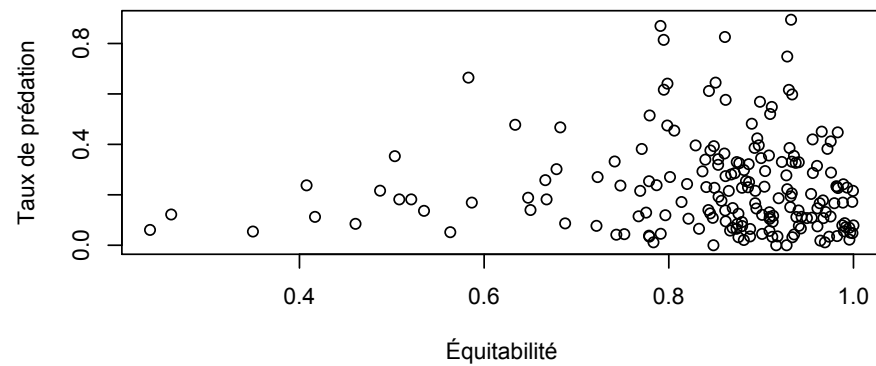
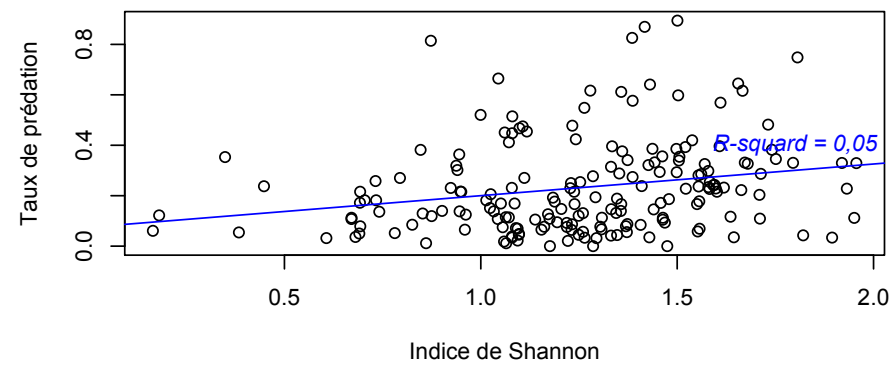
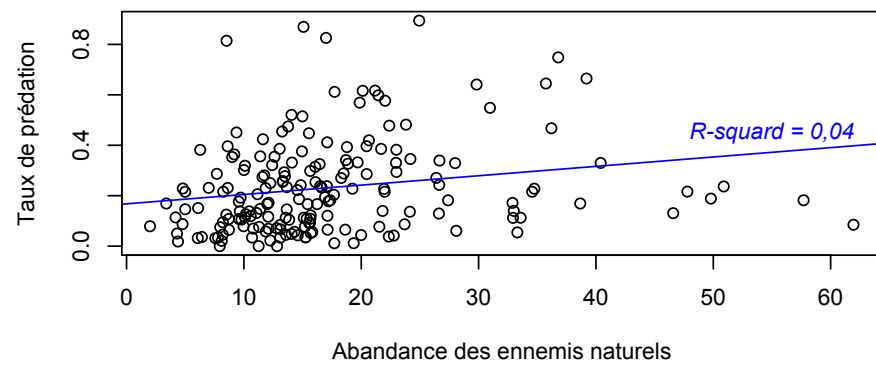


Figure 33. Taux de prédation en fonction des indices de biodiversité (données du Chapitre 2a et 3)

L'abondance ou la diversité d'une communauté ne suffisent pas à expliquer la relation avec le taux de prédation (Fig. 33). Si l'on s'intéresse seulement aux indices de biodiversité habituellement calculés, il est difficile de mettre en avant une des relations décrites par Straub et al (2008) mettant en relation les indices avec le contrôle biologique (R^2 très faible). Une approche basée sur l'étude des traits pourrait être envisagée pour affiner cette relation et dépasser le problème d'espèces présentes ou absentes sur certains vergers en calculant des indices de diversité fonctionnelle (de Bello et al. 2010). Des traits comme le degré de polyphagie, le mode de chasse, la stratification verticale et la capacité d'ingestion (réponse fonctionnelle) d'une proie seraient des critères importants à prendre en compte. Cependant, en l'état des connaissances, le manque de données écologiques sur les espèces des milieux agricoles ne permet pas d'intégrer facilement des traits pour comprendre la relation entre prédation des œufs de carpocapse et les prédateurs. Ce manque de connaissance peut aussi laisser supposer que l'on ignore l'existence d'un ou plusieurs prédateurs des œufs de carpocapse comme c'était le cas avec les opilions identifiés dans le chapitre 4 comme prédateurs des larves.

Afin de mieux comprendre l'impact des communautés, une approche expérimentale en laboratoire pourrait être envisagée, à l'image de l'étude réalisée par Northfield et al. (2014). Après avoir identifié les populations naturellement présentes dans des parcelles de *Brassica oleracea* (chou commun), ils ont reconstitué des cortèges différents d'espèces en conditions expérimentales et mesuré l'impact de ces populations sur la prédation des pucerons. Plutôt que d'étudier l'ensemble de la communauté d'ennemis naturels, l'accent pourrait être mis sur des couples d'ennemis naturels identifiés comme consommant des œufs de carpocapse. Dans notre cas on pourrait s'intéresser dans un premier temps à l'espèce *Cheiracanthum mildei* et aux deux espèces de forficules *Forficula pubescens* et *Forficula auricularia*. Y-a-t-il une compétition entre les espèces ? Quels est leur impact sur la consommation des œufs : leur efficacité (nombre d'œufs consommés), leur complémentarité par rapport à la ressource (compétition, neutre, facilitation) ? A la vue de nos résultats, *C. mildei* est peu sensible aux traitements phytosanitaires alors que *F. pubsecens* est très sensible, quelles pratiques favorisent la présence des deux espèces dans un verger ? Une

alternative serait de réaliser des lâchers inondatifs d'une ou de ces deux espèces pour réguler les populations de carpocapse.

La question de **l'échelle à laquelle se situe la corrélation entre la fonction de prédation et les ennemis naturels n'est pas non plus évidente**. Cette relation a-t-elle lieu à l'échelle de l'arbre, au sein d'un groupement d'arbres, au sein d'un verger ? Pearce et Zalucki (2006) se sont intéressés aux phénomènes d'agrégation des ravageurs, de la fonction de prédation et des ennemis naturels en culture de soja à l'échelle de la parcelle. L'agrégation des prédateurs n'est pas corrélée avec l'agrégation des ravageurs ou le taux de prédation. Les futures études pourraient s'intéresser à l'échelle spatiale à laquelle la fonction de prédation et l'abondance des ennemis naturels doit être mise en relation.

Nous avons, tout au long de la thèse, estimé la fonction de prédation via des organismes sentinelles. L'utilisation d'organismes sentinelles tels que les œufs ou les larves de carpocapse peuvent présenter **un biais par rapport à ce qui est observé in natura**, même si nous avons essayé de les minimiser (placement des œufs, stade des larves). Pour des raisons techniques, le nombre d'œufs sentinelles exposés ne peut correspondre à ce qui est observé naturellement (œufs pondus isolément, plus rarement par 2) cela peut entraîner une surestimation de la prédation. A l'inverse, le support sur lequel les œufs de carpocapse sont pondus pourrait représenter une perturbation lors de la recherche de la ressource par le prédateur, et donc entraîner une sous-estimation du taux de prédation.

Grâce à ces méthodes, nous avons estimé une des fonctions permettant de rendre le service de régulation des ravageurs. Même s'il s'agit d'un bon indicateur du rôle de la communauté d'ennemis naturels, elle ne reflète pas totalement le service rendu. En effet, le pourcentage de prédation mesuré n'a pas la même signification selon la pression sanitaire de la parcelle : 10% de prédation dans un verger présentant une faible infestation de carpocapse pourrait être potentiellement suffisant (si on passe sous le seuil économique) pour limiter la population alors que 10% dans un verger fortement infesté serait insuffisant. Il serait intéressant dans les futures études d'estimer le service de régulation (grâce à des mesures de dégâts, de rendement) et d'établir la relation entre la fonction de prédation et ce service. L'utilisation

d'organismes sentinelles pourrait alors être mise en place chez les producteurs, il constituerait un indicateur du service rendu dans leur verger. Les stratégies de protection pourraient ainsi être adaptées en vue de diminuer l'utilisation de pesticides.

Conclusions

Cette thèse a mis en évidence quatre stratégies de protection différentes au sein du mode de production AB en vergers de pommiers. Ces stratégies ne se placent pas sur un seul axe d'intensification mais plutôt sur deux axes d'intensification. Le premier axe est celui classiquement attendu, il oppose une intensification au sens classique du terme avec la stratégie de substitution à une intensification écologique avec la stratégie Écologiquement intensive avec au centre la stratégie Intégrée. Un deuxième axe est porté par une innovation technique permettant le développement de la stratégie Technologiquement intensive.

Ces stratégies, via les pratiques qui les constituent, ont des conséquences sur les communautés d'ennemis naturels. Certains ennemis naturels sont très impactés par les pratiques et peuvent donc être considérés comme des espèces bioindicatrices. C'est le cas de *Forficula pubescens*, très sensible aux pesticides et favorisé par une hauteur d'enherbement importante. Cependant, une forte variation d'abondance et de diversité des communautés d'ennemis naturels a été observée. Cela illustre la complexité du lien qu'il existe entre pratiques agricoles et les communautés.

Le taux de prédation des œufs de carpocapse augmente de mai à août. Le taux de prédation est principalement corrélé avec l'abondance de *Forficula auricularia*, *Forficula pubescens* et *Cheiracathium mildei*. Il est important de prendre en compte les caractéristiques des espèces pour comprendre la relation complexe qui existe entre ennemis naturels et fonction de prédation.

Malgré la complexité du lien entre pratiques agricoles, ennemis naturels et prédation, de nombreuses pistes de recherche restent ouvertes pour comprendre et maximiser la prédation du carpocapse afin de d'assurer sa régulation et diminuer l'utilisation de pesticides en AB.

References

- Agreste (2014) <http://agreste.agriculture.gouv.fr/>.
- Al Bitar L, Gorb SN, Zebitz CP, Voigt D (2012) Egg adhesion of the codling moth *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera, Tortricidae) to various substrates: I. Leaf surfaces of different apple cultivars *Arthropod-Plant Interactions* 6:471-488
- Alt'Carpo (2014) <http://www.alt-carpo.com/5.cfm?p=541-alt-carpo-alt-carpo-protection-carpocapse-severac-pommes-filet>.
- Altieri MA, Schmidt LL (1986) Cover crops affect in apple orchards *California Agriculture*:15
- Arthurs SP, Lacey LA, Miliczky ER (2007) Evaluation of the codling moth granulovirus and spinosad for codling moth control and impact on non-target species in pear orchards *Biological Control* 41:99-109
- Ashby JW (1974) A Study of Arthropod Predation of *Pieris rapae* L. Using Serological and Exclusion Techniques *Journal of Applied Ecology* 11:419-425 doi:10.2307/2402195
- Atanassov A, Shearer PW, Hamilton GC (2003) Peach Pest Management Programs Impact Beneficial Fauna Abundance and *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) Egg Parasitism and Predation *Environ Entomol* 32:780-788 doi:10.1603/0046-225x-32.4.780
- Audemard H (1991) Population dynamics of the codling moth. In: Van der Guest LPS EH, editors (ed) *World Crop Pests: Tortricid Pest, their Biologie, Natural Enemies and Control*. pp 329-338
- Balachowsky A (1966) *Entomologie Appliquee a l'agriculture*. Tome II: *Lepidopteres*. Masson et Cie., Editeurs,
- Barrière V, Lecompte F, Nicot PC, Maisonneuve B, Tchamitchian M, Lescourret F (2014) Lettuce cropping with less pesticides. A review *Agronomy for Sustainable Development* 34:175-198
- Bartoń K (2013) Model selection and model averaging based on information criteria (AICc and alike). R package
- Bates D, Maechler M, Bolker B, Walker S, RHB. C, Singmann H (2014) lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4 R package
- Bellon S, Penvern S (2014) *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures*. Springer,
- Bengtsson J, Ahnström J, Weibull A-C (2005) The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance: a meta-analysis *Journal of Applied Ecology* 42:261-269 doi:10.1111/j.1365-2664.2005.01005.x
- Bianchi F, Booij C, Tscharntke T (2006) Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 273:1715-1727
- Bickerton MW, Hamilton GC (2012) Effects of Intercropping with Flowering Plants on Predation of *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) Eggs by Generalist Predators in Bell Peppers *Environ Entomol* 41:612-620 doi:10.1603/en11249

- Biondi A, Mommaerts V, Smagghe G, Viñuela E, Zappalà L, Desneux N (2012) The non - target impact of spinosyns on beneficial arthropods *Pest Management Science* 68:1523-1536
- Blommers LHM (1994) INTEGRATED PEST-MANAGEMENT IN EUROPEAN APPLE ORCHARDS *Annu Rev Entomol* 39:213-241 doi:10.1146/annurev.ento.39.1.213
- Bogya S, Marko V, Szinetar C (2000) Effect of pest management systems on foliage- and grass-dwelling spider communities in an apple orchard in Hungary *International Journal of Pest Management* 46:241-250 doi:10.1080/09670870050206000
- Bommarco R, Kleijn D, Potts SG (2013) Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security *Trends in ecology & evolution* 28:230-238
- Bonny S (2010) Ecological intensification of agriculture: pathways and challenges
- L'intensification écologique de l'agriculture: voies et défis. Proceedings of a symposium on Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food, Montpellier, France, 28 June to 1st July 2010.
- Bureau de Roince C (2012) Biodiversité et aménagements fonctionnels en vergers de pommiers : implication des prédateurs généralistes et invertébrés dans le contrôle des ravageurs. Agroparistech
- Bureau de Roince C, Lavigne C, Ricard J-M, Franck P, Bouvier J-C, Garcin A, Symondson WOC (2012) Predation by generalist predators on the codling moth versus a closely-related emerging pest the oriental fruit moth: a molecular analysis *Agricultural and Forest Entomology* 14:260-269 doi:10.1111/j.1461-9563.2011.00564.x
- Brown A, Myers JH (2010) Temporal and spatial variability of rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* populations: is there a role of the alternate host plant *Plantago major*? *Agricultural and Forest Entomology* 12:333-341
- Brown MW (1999) Applying principles of community ecology to pest management in orchards *Agriculture, Ecosystems & Environment* 73:103-106 doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00018-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00018-3)
- Brown MW, Mathews CR (2007) Conservation biological control of rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* (Passerini), in Eastern North America *Environ Entomol* 36:1131-1139 doi:10.1603/0046-225x(2007)36[1131:cbcora]2.0.co;2
- Brown MW, Schmitt JJ (2001) Seasonal and Diurnal Dynamics of Beneficial Insect Populations in Apple Orchards Under Different Management Intensity *Environ Entomol* 30:415-424 doi:10.1603/0046-225x-30.2.415
- Buck D, Getz C, Guthman J (1997) From farm to table: The organic vegetable commodity chain of northern California *Sociol Rural* 37:3-& doi:10.1111/1467-9523.00033
- Bürger J, Günther A, de Mol F, Gerowitt B (2012) Analysing the influence of crop management on pesticide use intensity while controlling for external sources of variability with Linear Mixed Effects Models *Agricultural Systems* 111:13-22 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2012.05.002>
- Burnip G, Daly J, Hackett J, Suckling D (2002) European earwig phenology and effect of understorey management on population estimation *New Zealand Plant Protection*:390-395

- Capowiez Y et al. (2014) Impacts agronomiques et environnementaux d'une méthode de lutte permettant de réduire fortement l'usage des pesticides : les filets Alt'Carpo en arboriculture. .
- Cardinale BJ, Harvey CT, Gross K, Ives AR (2003) Biodiversity and biocontrol: emergent impacts of a multi - enemy assemblage on pest suppression and crop yield in an agroecosystem *Ecology Letters* 6:857-865
- Cardoso P, Pekar S, Jocque R, Coddington JA (2011) Global Patterns of Guild Composition and Functional Diversity of Spiders *PLoS One* 6 doi:e21710 10.1371/journal.pone.0021710
- Cassman KG (1999) Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96:5952-5959
- Chang GC, Snyder WE (2004) The relationship between predator density, community composition, and field predation of Colorado potato beetle eggs *Biological Control* 31:453-461 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2004.07.009>
- Chaplin - Kramer R, O' Rourke ME, Blitzer EJ, Kremen C (2011) A meta - analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity *Ecology Letters* 14:922-932
- Chessel D, Dufour A-B, Thioulouse J (2004) The ade4 package-I- One-table methods. *R News* 4:5-10
- Cisneros J, Goulson D, Derwent LC, Penagos DI, Hernández O, Williams T (2002) Toxic Effects of Spinosad on Predatory Insects *Biological Control* 23:156-163 doi:10.1006/bcon.2001.1000
- Costanza R et al. (1998) The value of the world's ecosystem services and natural capital
- Crowder DW, Jabbour R (2014) Relationships between biodiversity and biological control in agroecosystems: Current status and future challenges *Biological Control* 75:8-17 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.10.010>
- Crowder DW, Northfield TD, Strand MR, Snyder WE (2010) Organic agriculture promotes evenness and natural pest control *Nature* 466:109-U123 doi:10.1038/nature09183
- Daily GC, Matson PA (2008) Ecosystem services: From theory to implementation *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105:9455-9456
- Darnhofer I, Lindenthal T, Bartel-Kratochvil R, Zollitsch W (2010) Conventionalisation of organic farming practices: from structural criteria towards an assessment based on organic principles. A review *Agronomy for Sustainable Development* 30:67-81 doi:10.1051/agro/2009011
- Darré J, Mathieu A, Lasseur J (2004) Le sens des pratiques. Conceptions d'agriculteurs et modèles d'agronomes.
- de Bello F et al. (2010) Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits *Biodiversity and Conservation* 19:2873-2893
- De Groot RS, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemsen L (2010) Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making *Ecological Complexity* 7:260-272

- Debras J-F, Dussaud A, Rieux R, Dutoit T (2007) Recherche prospective sur le rôle «source» des haies en production fruitière intégrée. Le cas des perce-oreilles: *Forficula auricularia* L. et *Forficula pubescens* Gené Comptes Rendus Biologies 330:664-673
- Demeter (2014) <http://www.demeter.fr/>.
- Dib H (2010) Rôle des ennemis naturels dans la lutte biologique contre le puceron cendré, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera: Aphididae) en vergers de pommiers Université d'Avignon et des pays de Vaucluse
- Dib H, Jamont M, Sauphanor B, Capowiez Y (2011) Predation potency and intraguild interactions between generalist (*Forficula auricularia*) and specialist (*Episyrphus balteatus*) predators of the rosy apple aphid (*Dysaphis plantaginea*) Biological Control 59:90-97 doi:10.1016/j.biocontrol.2011.07.012
- Dib H, Sauphanor B, Capowiez Y (2010a) Effect of codling moth exclusion nets on the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea*, and its control by natural enemies Crop Protection 29:1502-1513 doi:10.1016/j.cropro.2010.08.012
- Dib H, Simon S, Sauphanor B, Capowiez Y (2010b) The role of natural enemies on the population dynamics of the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera: Aphididae) in organic apple orchards in south-eastern France Biological Control 55:97-109 doi:10.1016/j.biocontrol.2010.07.005
- Dobbs EK, Potter DA (2014) Conservation biological control and pest performance in lawn turf: does mowing height matter? Environ Manage 53:648-659
- Doré T, Dufumier M, Rivière-Wekstein G (2013) L'agriculture biologique: espoir ou chimère?, collection Le choc des idées, 128 p. Paris: Edition Le Muscadier.
- Doré T, Makowski D, Malézieux E, Munier-Jolain N, Tchamitchian M, Tittone P (2011) Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: revisiting methods, concepts and knowledge European Journal of Agronomy 34:197-210
- Drummond F, Collins J, Choate B, Woodman D, Jennings D, Forsythe Jr H, Cokendolpher J (2010) Harvestman (Opiliones) fauna associated with Maine lowbush blueberry fields in the major production areas of Washington and Hancock counties Environ Entomol 39:1428-1440
- Epstein DL, Zack RS, Brunner JF, Gut L, Brown JJ (2001) Ground Beetle Activity in Apple Orchards under Reduced Pesticide Management Regimes Biological Control 21:97-104 doi:<http://dx.doi.org/10.1006/bcon.2001.0929>
- Evans EW (2009) Lady beetles as predators of insects other than Hemiptera Biological Control 51:255-267 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.05.011>
- FAUVEL G, RAMBIER A, BALDUQUE-MARTIN R (1981) La technique du battage pour la surveillance des ravageurs en cultures fruitière et florale. I.-- Comparaison des résultats obtenus en verger de pommiers avec des entonnoirs rigides de taille moyenne et avec des entonnoirs en toile. Étude de l'influence de quelques facteurs sur l'efficacité du battage Agronomie 1:105-111

- Finke DL, Denno RF (2003) Intra-guild predation relaxes natural enemy impacts on herbivore populations *Ecological Entomology* 28:67-73 doi:10.1046/j.1365-2311.2003.00475.x
- Finke DL, Snyder WE (2010) Conserving the benefits of predator biodiversity *Biological Conservation* 143:2260-2269 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2010.03.022>
- Frank SD, Wratten SD, Sandhu HS, Shrewsbury PM (2007) Video analysis to determine how habitat strata affects predator diversity and predation of *Epiphyas postvittana* (Lepidoptera: Tortricidae) in a vineyard *Biological Control* 41:230-236 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2007.01.012>
- Garratt MPD, Wright DJ, Leather SR (2011) The effects of farming system and fertilisers on pests and natural enemies: A synthesis of current research *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141:261-270 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.014>
- Geiger F et al. (2010) Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland *Basic and Applied Ecology* 11:97-105
- Geniaux G et al. (2010) Les déterminants de la conversion à l'agriculture biologique: une revue de la littérature économique
- Glen DM (1977) Predation of codling moth eggs, *Cydia pomonella*, predators responsible and their alternative prey *Journal of Applied Ecology* 14:445-456 doi:10.2307/2402557
- Glen DM, Milsom NF (1978) Survival of mature larvae of codling moth (*Cydia pomonella*) on apple trees and ground *Annals of Applied Biology* 90:133-146 doi:10.1111/j.1744-7348.1978.tb02620.x
- Goggin FL (2007) Plant-aphid interactions: molecular and ecological perspectives *Current Opinion in Plant Biology* 10:399-408 doi:10.1016/j.pbi.2007.06.004
- Grechi I, Sauge M-H, Sauphanor B, Hilgert N, Senoussi R, Lescourret F (2008) How does winter pruning affect peach tree-*Myzus persicae* interactions? *Entomologia Experimentalis et Applicata* 128:369-379 doi:10.1111/j.1570-7458.2008.00720.x
- Griffon M (2007) Intensive agriculture must know unavoidable changes *Cah Agric* 16:85-86
- Guennelon G, Audemard H, Fremond J, El Idrissi Ammarim M (1981) Progrès réalisés dans l'élevage permanent du Carpocapse (*Laspeyresia pomonella* L.) sur milieu artificiel *Agronomie* 1:59-64
- Haines-Young R, Potschin M (2009) Methodologies for defining and assessing ecosystem services. vol Final Report. JNCC,
- Halaj J, Cady AB (2000) Diet Composition and Significance of Earthworms as Food of Harvestmen (Arachnida: Opiliones) *American Midland Naturalist* 143:487-491 doi:10.2307/3083071
- Helsen H, Vaal F, Blommers L (1998) Phenology of the common earwig *Forficula auricularia* L. (Dermaptera: Forficulidae) in an apple orchard *International Journal of Pest Management* 44:75-79 doi:10.1080/096708798228356
- Hicks BJ, McKenzie F, Cosens D, Watt AD (2003) Harvestmen abundance and diversity within lodgepole and Scots pine plantations of Scotland and

- their impact on pine beauty moth populations *Forest Ecology and Management* 182:355-361 doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00093-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00093-8)
- Hill SB (2014) Considerations for Enabling the Ecological Redesign of Organic and Conventional Agriculture: A Social Ecology and Psychosocial Perspective. In: Bellon S, Penvern S (eds) *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures*. Springer Netherlands, pp 401-422. doi:10.1007/978-94-007-7927-3_22
- Hill SB, Vincent C, Chouinard G (1999) Evolving ecosystems approaches to fruit insect pest management *Agric Ecosyst Environ* 73:107-110 doi:10.1016/s0167-8809(99)00019-5
- Hogg B, Gillespie R, Daane K (2010) Regional patterns in the invasion success of *Cheiracanthium* spiders (Miturgidae) in vineyard ecosystems *Biol Invasions* 12:2499-2508 doi:10.1007/s10530-009-9659-1
- Hogg BN, Daane KM (2011) Diversity and invasion within a predator community: impacts on herbivore suppression *Journal of Applied Ecology* 48:453-461 doi:10.1111/j.1365-2664.2010.01940.x
- Hole DG, Perkins AJ, Wilson JD, Alexander IH, Grice F, Evans AD (2005) Does organic farming benefit biodiversity? *Biological Conservation* 122:113-130 doi:10.1016/j.biocon.2004.07.018
- Horrigan L, Lawrence RS, Walker P (2002) How sustainable agriculture can address the environmental and human health harms of industrial agriculture *Environmental health perspectives* 110:445
- Horton DR et al. (2003) Effects of mowing frequency on densities of natural enemies in three Pacific Northwest pear orchards *Entomologia Experimentalis et Applicata* 106:135-145 doi:10.1046/j.1570-7458.2003.00018.x
- Horton DR, Jones VP, Unruh TR (2009) Use of a New Immunomarking Method to Assess Movement by Generalist Predators Between a Cover Crop and Tree Canopy in a Pear Orchard *American Entomologist* 55:49-56
- Horvath R, Magura T, Szinetar C, Tóthmérész B (2009) Spiders are not less diverse in small and isolated grasslands, but less diverse in overgrazed grasslands: A field study (East Hungary, Nyirseg) *Agriculture, Ecosystems & Environment* 130:16-22
- Hothorn T, Bretz F, Westfall P (2008) Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical Journal* 50: 346--363
- Hubbell BJ, Carlson GA (1998) Effects of Insecticide Attributes on Within-Season Insecticide Product and Rate Choices: The Case of U.S. Apple Growers *American Journal of Agricultural Economics* 80:382-396 doi:10.2307/1244510
- IFOAM <http://www.ifoam.org/>.
- INRA (2013) Vers des agricultures à hautes performances. Comment rendre l'agriculture biologique française plus productive et plus compétitive. INRA,
- IOBC (2005) Classification of Side Effects to Beneficial Organisms. IOBC WPRS,
- Jansen JP, Defrance T, Warnier AM (2010) Effects of organic - farming - compatible insecticides on four aphid natural enemy species *Pest Management Science* 66:650-656

- Jørgensen L (1999) Denmark's action plans for pesticides: status and role of research. *Nordisk Jordbrugsforskning* 81:201-202
- Kromp B (1989) Carabid beetle communities (Carabidae, coleoptera) in biologically and conventionally farmed agroecosystems *Agriculture, Ecosystems & Environment* 27:241-251 doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0167-8809\(89\)90089-3](http://dx.doi.org/10.1016/0167-8809(89)90089-3)
- Kruess A, Tscharntke T (2002) Contrasting responses of plant and insect diversity to variation in grazing intensity *Biological Conservation* 106:293-302 doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0006-3207\(01\)00255-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0006-3207(01)00255-5)
- Lamine C (2011) Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM *J Rural Stud* 27:209-219 doi:10.1016/j.jrurstud.2011.02.001
- Lamine C, Bellon S (2009) Conversion to organic farming: a multidimensional research object at the crossroads of agricultural and social sciences. A review *Agronomy for Sustainable Development* 29:97-112 doi:10.1051/agro:2008007
- Landis DA, Wratten SD, Gurr GM (2000) Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture *Annu Rev Entomol* 45:175-201 doi:10.1146/annurev.ento.45.1.175
- Langellotto G, Denno R (2004) Responses of invertebrate natural enemies to complex-structured habitats: a meta-analytical synthesis *Oecologia* 139:1-10 doi:10.1007/s00442-004-1497-3
- Lawton J (1983) Plant architecture and the diversity of phytophagous insects *Annu Rev Entomol* 28:23-39
- Le Bellec F, Cattan P, Bonin M, Rajaud A (2011) Building a typology of cropping practices from comparison with a technical reference: first step for a relevant cropping system redesigning process—results for tropical citrus production *Fruits* 66:143-159
- Lefebvre M, Langrell SH, Gomez-y-Paloma S (2014) Incentives and policies for integrated pest management in Europe: a review *Agronomy for Sustainable Development*:1-19 doi:10.1007/s13593-014-0237-2
- Legendre P, Gallagher ED (2001) Ecologically meaningful transformations for ordination of species data *Oecologia* 129:271-280 doi:10.1007/s004420100716
- Legrand A, Barbosa P (2003) Plant Morphological Complexity Impacts Foraging Efficiency of Adult *Coccinella septempunctata* L. (Coleoptera: Coccinellidae) *Environ Entomol* 32:1219-1226 doi:10.1603/0046-225x-32.5.1219
- Letourneau DK, Bothwell SG (2008) Comparison of organic and conventional farms: challenging ecologists to make biodiversity functional *Front Ecol Environ* 6:430-438 doi:10.1890/070081
- Letourneau DK, Goldstein B (2001) Pest damage and arthropod community structure in organic vs. conventional tomato production in California *Journal of Applied Ecology* 38:557-570 doi:10.1046/j.1365-2664.2001.00611.x
- Letourneau DK, Jedlicka JA, Bothwell SG, Moreno CR (2009) Effects of Natural Enemy Biodiversity on the Suppression of Arthropod Herbivores in Terrestrial Ecosystems. In: *Annual Review of Ecology Evolution and*

- Systematics, vol 40. Annual Review of Ecology Evolution and Systematics. pp 573-592. doi:10.1146/annurev.ecolsys.110308.120320
- Lohr L, Park TA (2002) Choice of insect management portfolios by organic farmers: lessons and comparative analysis *Ecol Econ* 43:87-99 doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00184-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00184-2)
- Lordan J, Alegre S, Blanco R, Sarasúa M-J, Alins G (2014) Aggregation behavior in the European earwig: Response to impregnated shelters *Crop Protection* 65:71-76 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2014.07.005>
- Losey JE, Denno RF (1998) Positive predator-predator interactions: enhanced predation rates and synergistic suppression of aphid populations *Ecology* 79:2143-2152
- Lucas E, Coderre D, Brodeur J (1998) Intraguild predation among aphid predators: characterization and influence of extraguild prey density *Ecology* 79:1084-1092
- Malagnoux L (2014) Evaluation des impacts environnementaux liés aux pratiques phytosanitaires en vergers de pommiers. Approche écotoxicologique et écologique utilisant un auxiliaire des cultures, le forficule.
- Mansour F (1984) A malathion-tolerant strain of the spider *Chiracanthium mildei* and its response to chlorpyrifos. *Phytoparasitica* 12:163-166
- Markó V, Blommers LHM, Bogya S, Helsen H (2008) Kaolin particle films suppress many apple pests, disrupt natural enemies and promote woolly apple aphid *Journal of Applied Entomology* 132:26-35 doi:10.1111/j.1439-0418.2007.01233.x
- Markó V, Keresztes B (2014) Flowers for better pest control? Ground cover plants enhance apple orchard spiders (Araneae), but not necessarily their impact on pests *Biocontrol Science and Technology* 24:574-596 doi:10.1080/09583157.2014.881981
- Markó V, Keresztes B, Fountain MT, Cross JV (2009) Prey availability, pesticides and the abundance of orchard spider communities *Biological Control* 48:115-124
- Mathews CR, Bottrell DG, Brown MW (2004) Habitat manipulation of the apple orchard floor to increase ground-dwelling predators and predation of *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) *Biological Control* 30:265-273 doi:10.1016/j.biocontrol.2003.11.006
- Matson PA, Parton WJ, Power A, Swift M (1997) Agricultural intensification and ecosystem properties *Science* 277:504-509
- MEA MEA (2005) *Ecosystems and human well-being* vol 5. Island Press Washington, DC,
- Mediene S et al. (2011) Agroecosystem management and biotic interactions: a review *Agronomy for Sustainable Development* 31:491-514 doi:10.1007/s13593-011-0009-1
- Miliczky ER, Horton DR (2005) Densities of beneficial arthropods within pear and apple orchards affected by distance from adjacent native habitat and association of natural enemies with extra-orchard host plants *Biological Control* 33:249-259 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2005.03.002>
- Minarro M, Espadaler X, Melero VX, Suarez-Alvarez V (2009) Organic versus conventional management in an apple orchard: effects of fertilization and

- tree-row management on ground-dwelling predaceous arthropods
Agricultural and Forest Entomology 11:133-142 doi:10.1111/j.1461-9563.2008.00403.x
- Minarro M, Fernández-Mata G, Medina P (2010) Role of ants in structuring the aphid community on apple Ecological Entomology 35:206-215 doi:10.1111/j.1365-2311.2010.01173.x
- Mols CM, Van Noordwijk AJ, Visser ME (2005) Assessing the reduction of caterpillar numbers by Great Tits *Parus major* breeding in apple orchards Ardea 93:259-269
- Mols CMM, Visser ME (2002) Great tits can reduce caterpillar damage in apple orchards Journal of Applied Ecology 39:888-899 doi:10.1046/j.1365-2664.2002.00761.x
- Monteiro LB, Lavigne C, Ricci B, Franck P, Toubon J-F, Sauphanor B (2013) Predation of codling moth eggs is affected by pest management practices at orchard and landscape levels Agriculture, Ecosystems & Environment doi:10.1016/j.agee.2011.10.012
- Murdoch WW (1969) Switching in General Predators: Experiments on Predator Specificity and Stability of Prey Populations Ecological Monographs 39:335-354 doi:10.2307/1942352
- Musser FR, Shelton AM (2003) Predation of *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) Eggs in Sweet Corn by Generalist Predators and the Impact of Alternative Foods Environ Entomol 32:1131-1138 doi:10.1603/0046-225x-32.5.1131
- Nagy C, Cross JV, Markó V (2013) Sugar feeding of the common black ant, *Lasius niger* (L.), as a possible indirect method for reducing aphid populations on apple by disturbing ant-aphid mutualism Biological Control 65:24-36
- Northfield TD, Crowder DW, Takizawa T, Snyder WE (2014) Pairwise interactions between functional groups improve biological control Biological Control doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.07.008
- Objectifs info Arbo (2014) Guide de protection fruitière intégrée.
- Padel S (2001) Conversion to organic farming : a typical exemple of the diffusion of an innovation ? Sociol Rural 41:40-61
- Paredes D, Cayuela L, Campos M (2013) Synergistic effects of ground cover and adjacent vegetation on natural enemies of olive insect pests Agriculture, Ecosystems & Environment 173:72-80 doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.016
- Park YC, Kim JP (2007) Diversity of spider communities in a pesticide-treated pine (*Pinus densiflora*) forest Journal of Ecology and Environment 30:179-186
- Pearce S, Hebrón WM, Raven RJ, Zalucki MP, Hassan E (2004) Spider fauna of soybean crops in south-east Queensland and their potential as predators of *Helicoverpa* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) Australian Journal of Entomology 43:57-65 doi:10.1111/j.1440-6055.2003.00378.x
- Pearce S, Zalucki MP (2006) Do predators aggregate in response to pest density in agroecosystems? Assessing within - field spatial patterns Journal of Applied Ecology 43:128-140

- Pekár S, Beneš J (2008) Aged pesticide residues are detrimental to agrobiont spiders (Araneae) *Journal of Applied Entomology* 132:614-622 doi:10.1111/j.1439-0418.2008.01294.x
- Penvern S, Bellon S, Fauriel J, Sauphanor B (2010) Peach orchard protection strategies and aphid communities: Towards an integrated agroecosystem approach *Crop Protection* 29:1148-1156 doi:10.1016/j.cropro.2010.06.010
- Pérez-Guerrero S, Gelan-Begna A, Vargas-Osuna E (2013) Impact of *Cheiracanthium pelasgicum* (Araneae: Miturgidae) and *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae) intraguild predation on the potential control of cotton pest *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) *Biocontrol Science and Technology* 24:216-228 doi:10.1080/09583157.2013.855167
- Pfannenstiel RS (2008) Spider predators of lepidopteran eggs in south Texas field crops *Biological Control* 46:202-208 doi:10.1016/j.biocontrol.2008.03.011
- Pfiffner L, Niggli U (1996) Effects of Bio-dynamic, Organic and Conventional Farming on Ground Beetles (Col. Carabidae) and Other Epigaeic Arthropods in Winter Wheat *Biological Agriculture & Horticulture* 12:353-364 doi:10.1080/01448765.1996.9754758
- Pinol J, Espadaler X, Cañellas N, Pérez N (2009) Effects of the concurrent exclusion of ants and earwigs on aphid abundance in an organic citrus grove *BioControl* 54:515-527
- Piñol J, Espadaler X, Pérez N, Beven K (2009) Testing a new model of aphid abundance with sedentary and non-sedentary predators *Ecol Model* 220:2469-2480
- Price PW (1991) The plant vigor hypothesis and herbivore attack *Oikos*:244-251
- Programme Ambition bio 2017 (2014) <http://agriculture.gouv.fr/Programme-Ambition-bio-2017,22587>.
- Puech C, Baudry J, Joannon A, Poggi S, Aviron S (2014) Organic vs. conventional farming dichotomy: Does it make sense for natural enemies? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 194:48-57 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2014.05.002>
- PURE (2013) Risk analysis of resistance development towards natural antagonists of crop pests and diseases.
- R Development Core Team (2010) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing., Vienna
- Rana JS, Dixon AFG, Jarošík V (2002) Costs and benefits of prey specialization in a generalist insect predator *Journal of Animal Ecology* 71:15-22 doi:10.1046/j.0021-8790.2001.00574.x
- Ratnadass A, Fernandes P, Avelino J, Habib R (2012) Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review *Agronomy for Sustainable Development* 32:273-303 doi:10.1007/s13593-011-0022-4
- Renwick J, Chew F (1994) Oviposition behavior in Lepidoptera *Annu Rev Entomol* 39:377-400
- Ricci B (2009) Dynamique spatiale et dégâts de carpocapse dans la basse vallée de la Durance Université d'Avignon et des pays de Vaucluse

- Riddick EW, Mills NJ (1994) Potential of Adult Carabids (Coleoptera: Carabidae) as Predators of Fifth-Instar Codling Moth (Lepidoptera: Tortricidae) in Apple Orchards in California *Environ Entomol* 23:1338-1345
- Rieux R, Simon S, Defrance H (1999) Role of hedgerows and ground cover management on arthropod populations in pear orchards *Agriculture, Ecosystems & Environment* 73:119-127
doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00021-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00021-3)
- Rigby D, Caceres D (2001) Organic farming and the sustainability of agricultural systems *Agricultural Systems* 68:21-40 doi:10.1016/s0308-521x(00)00060-3
- Rivière-Wekstein G (2011) Bio fausses promesses et vrai marketing. Le Publieur,
- Robinson KA, Jonsson M, Wratten SD, Wade MR, Buckley HL (2008) Implications of floral resources for predation by an omnivorous lacewing *Basic and Applied Ecology* 9:172-181
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.baae.2007.01.002>
- Romeu-Dalmau C, Espadaler X, Pinol J (2012) Abundance, interannual variation and potential pest predator role of two co-occurring earwig species in citrus canopies *Journal of Applied Entomology* 136:501-509
doi:10.1111/j.1439-0418.2011.01671.x
- Sandhu HS, Wratten SD, Cullen R (2010) Organic agriculture and ecosystem services *Environmental Science & Policy* 13:1-7
doi:10.1016/j.envsci.2009.11.002
- Santos SAP, Pereira JA, Torres LM, Nogueira AJA (2007) Evaluation of the effects, on canopy arthropods, of two agricultural management systems to control pests in olive groves from north-east of Portugal *Chemosphere* 67:131-139 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.014>
- Sauge MH, Grechi I, Poëssel JL (2010) Nitrogen fertilization effects on *Myzus persicae* aphid dynamics on peach: vegetative growth allocation or chemical defence? *Entomologia Experimentalis et Applicata* 136:123-133
- Sauphanor B, Bouvier J, Boisneau C, Rieux R, Simon S, Capowiez Y (2005) Impacts biologiques des systèmes de protection en vergers de pommiers *PHYTOMA, La Défense des Végétaux* 581:42-46
- Sauphanor B et al. (2009) Analyse comparative de différents systèmes en arboriculture fruitière.
- Sauphanor B, Severac G, Maugin S, Toubon JF, Capowiez Y (2012) Exclusion netting may alter reproduction of the codling moth (*Cydia pomonella*) and prevent associated fruit damage to apple orchards *Entomologia Experimentalis et Applicata* 145:134-142 doi:10.1111/j.1570-7458.2012.01320.x
- Sauphanor B, Sureau F (1993) Aggregation behavior and interspecific relationships in *Dermaptera*. *Oecologia* 96:360-364
doi:10.1007/bf00317506
- Schellhorn NA, Bianchi F, Hsu CL (2014) Movement of Entomophagous Arthropods in Agricultural Landscapes: Links to Pest Suppression. In: Berenbaum MR (ed) *Annual Review of Entomology*, Vol 59, 2014, vol 59. *Annual Review of Entomology*. pp 559-581. doi:10.1146/annurev-ento-011613-161952

- Shaw PW, Wallis DR (2010) Susceptibility of the European earwig, *Forficula auricularia*, to insecticide residues on apple leaves New Zealand Plant Protection 63:55-59
- Silva EB, Franco JC, Vasconcelos T, Branco M (2010) Effect of ground cover vegetation on the abundance and diversity of beneficial arthropods in citrus orchards Bulletin of Entomological Research 100:489-499 doi:doi:10.1017/S0007485309990526
- Simon S, Bouvier J-C, Debras J-F, Sauphanor B (2010) Biodiversity and pest management in orchard systems. A review Agronomy for Sustainable Development 30:139-152 doi:10.1051/agro/2009013
- Simon S, Brun L, Guinaudeau J, Sauphanor B (2011) Pesticide use in current and innovative apple orchard systems Agronomy for Sustainable Development 31:541-555 doi:10.1007/s13593-011-0003-7
- Simon S, Defrance H, Sauphanor B (2007) Effect of codling moth management on orchard arthropods Agric Ecosyst Environ 122:340-348 doi:10.1016/j.agee.2007.01.020
- Simon S, Lauri P, Brun L, Defrance H, Sauphanor B (2006) Does manipulation of fruit-tree architecture affect the development of pests and pathogens? A case study in an organic apple orchard Journal of horticultural science & biotechnology 81:765-773
- Smith MW, Arnold DC, Eikenbary RD, Rice NR, Shiferaw A, Cheary BS, Carroll BL (1996) Influence of ground cover on beneficial arthropods in pecan Biological Control 6:164-176
- Solomon ME, Glen DM (1979) Prey Density and Rates of Predation by Tits (*Parus* Spp.) on Larvae of Codling Moth (*Cydia pomonella*) under Bark Journal of Applied Ecology 16:49-59 doi:10.2307/2402727
- Stachowicz JJ (2001) Mutualism, Facilitation, and the Structure of Ecological Communities: Positive interactions play a critical, but underappreciated, role in ecological communities by reducing physical or biotic stresses in existing habitats and by creating new habitats on which many species depend Bioscience 51:235-246 doi:10.1641/0006-3568(2001)051[0235:mfatso]2.0.co;2
- Steiner R (1924) Le Cours aux Agriculteurs
Novalis edn.,
- Stewart-Jones A, Pope TW, Fitzgerald JD, Poppy GM (2008) The effect of ant attendance on the success of rosy apple aphid populations, natural enemy abundance and apple damage in orchards Agricultural and Forest Entomology 10:37-43 doi:10.1111/j.1461-9563.2007.00353.x
- Straub CS, Finke DL, Snyder WE (2008) Are the conservation of natural enemy biodiversity and biological control compatible goals? Biological Control 45:225-237 doi:10.1016/j.biocontrol.2007.05.013
- Suckling DM, Walker JTS, Wearing CH (1999) Ecological impact of three pest management systems in New Zealand apple orchards Agriculture, Ecosystems & Environment 73:129-140 doi:10.1016/s0167-8809(99)00022-5
- Symondson WOC, Sunderland KD, Greenstone MH (2002) Can generalist predators be effective biocontrol agents? Annu Rev Entomol 47:561-594 doi:10.1146/annurev.ento.47.091201.145240

- Tassoni A, Tango N, Ferri M (2013) Comparison of biogenic amine and polyphenol profiles of grape berries and wines obtained following conventional, organic and biodynamic agricultural and oenological practices *Food Chemistry* 139:405-413
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.01.041>
- Theiling K, Croft B (1988) Pesticide Side-Effects on Arthropod Natural Enemies: a Database Summary. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 21:191-218
- Thomson LJ, Hoffmann AA (2006) Field validation of laboratory-derived IOBC toxicity ratings for natural enemies in commercial vineyards *Biological Control* 39:507-515
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2006.06.009>
- Townsend CR, Begon M, Harper JL (2003) *Essentials of ecology*. vol Ed. 2. Blackwell Science,
- Tscharntke T, Klein AM, Kruess A, Steffan-Dewenter I, Thies C (2005) Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity – ecosystem service management *Ecology Letters* 8:857-874 doi:10.1111/j.1461-0248.2005.00782.x
- UIPP <http://www.uipp.org/>.
- Vasseur C, Joannon A, Aviron S, Burel F, Meynard J-M, Baudry J (2013) The cropping systems mosaic: How does the hidden heterogeneity of agricultural landscapes drive arthropod populations? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 166:3-14
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.08.013>
- Venzon M, Oliveira RM, Perez AL, Rodríguez - Cruz FA, Martins Filho S (2013) Lime sulfur toxicity to broad mite, to its host plants and to natural enemies *Pest Management Science* 69:738-743
- Wan N-F, Ji X-Y, Gu X-J, Jiang J-X, Wu J-H, Li B (2014) Ecological engineering of ground cover vegetation promotes biocontrol services in peach orchards *Ecological Engineering* 64:62-65
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.033>
- Welch KD, Harwood JD (2014) Temporal dynamics of natural enemy-pest interactions in a changing environment *Biological Control*
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.01.004>
- Williams T, Valle J, Viñuela E (2003) Is the naturally derived insecticide Spinosad® compatible with insect natural enemies? *Biocontrol Science and Technology* 13:459-475
- Winqvist C et al. (2011) Mixed effects of organic farming and landscape complexity on farmland biodiversity and biological control potential across Europe *Journal of Applied Ecology* 48:570-579
doi:10.1111/j.1365-2664.2010.01950.x
- Wratten SD, Gillespie M, Decourtye A, Mader E, Desneux N (2012) Pollinator habitat enhancement: Benefits to other ecosystem services *Agriculture, Ecosystems & Environment* 159:112-122
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.06.020>
- Wyss E, Daniel C (2004) Effects of autumn kaolin and pyrethrin treatments on the spring population of *Dysaphis plantaginea* in apple orchards *Journal of Applied Entomology* 128:147-149

- Wyss E, Luka H, Pfiffner L, Schlatter C, Gabriela U, Daniel C (2005) Approaches to pest management in organic agriculture: a case study in European apple orchards Cab International: Organic-Researchcom
- Zehnder G, Gurr GM, Kuhne S, Wade MR, Wratten SD, Wyss E (2007) Arthropod pest management in organic crops. In: Annual Review of Entomology, vol 52. Annual Review of Entomology. pp 57-80. doi:10.1146/annurev.ento.52.110405.091337
- Zhang W, Ricketts TH, Kremen C, Carney K, Swinton SM (2007) Ecosystem services and dis-services to agriculture Ecol Econ 64:253-260 doi:10.1016/j.ecolecon.2007.02.024
- Zuur A, Leno EN, Walker N, Saveliev AA, Smith GM (2009) Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R.